

Сборник научных статей



ФИЗИКА ГЕОСФЕР

ВЫПУСК 2

Владивосток
2020

ФИЗИКА ГЕОСФЕР

PHYSICS OF GEOSPHERES

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

PHYSICS OF GEOSPHERES

The collection of scientific articles
on selected materials
XI All-Russian Symposium
“Physics of Geospheres”

Issue 2



Vladivostok
Dalnauka
2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук

ФИЗИКА ГЕОСФЕР

Сборник научных статей
по избранным материалам
XI Всероссийского симпозиума
«Физика геосфер»

Выпуск 2



Владивосток
Дальнаука
2020

UDC 534.23

Physics of geospheres. Iss. 2. – Vladivostok. V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, 2020. 192 p.

The collection of selected scientific articles was prepared in the hydroacoustic direction, the importance of research on which was repeatedly emphasized during the 11-th All-Russian Symposium «Physics of Geospheres.» The collection discusses some of the key problems, associated with the formation, distribution and transformation of different-scale hydroacoustic fields in the offshore zones of the seas.

Editorial board:

Dolgikh Grigory Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of RAS, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS;

Korochentsev Vladimir Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Far Eastern Federal University;

Lugovoy Vladimir Alexandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Mining FEB RAS;

Yaroshchuk Igor Olegovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS.

The publication of the article collection was supported by the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Approved for publication by the Academic Council of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS.

ISSN 2686-7621

© V.I. Il'ichev Pacific Oceanological
Institute of FEB RAS, 2020

© Authors, 2020

© Dalnauka, 2020

УДК 534.23

Физика геосфер. Вып. 2. – Владивосток: ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, 2020. 192 с.

Сборник избранных научных статей подготовлен по гидроакустическому направлению, важность исследований по которому неоднократно подчеркивалась при проведении одиннадцатого Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». В сборнике рассматриваются некоторые ключевые проблемы, связанные с формированием, распространением и трансформацией разномасштабных гидроакустических полей в шельфовых зонах морей.

Редакционная коллегия:

Долгих Григорий Иванович – академик РАН, д.ф.-м.н., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Короченцев Владимир Иванович – д.ф.-м.н., Дальневосточный федеральный университет.

Луговой Владимир Александрович – д.ф.-м.н., Институт горного дела ДВО РАН.

Ярошук Игорь Олегович – д.ф.-м.н., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Издание сборника статей осуществлено при поддержке ДВО РАН.

Утверждено к печати Ученым советом Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

ISSN 2686-7621

© Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, 2020

© Коллектив авторов, 2020

© «Издательство Дальнаука», 2020

CONTENT

Preface	8
<i>Bulanov V.A., Korskov I.V., Storozhenko A.V.</i> ON SOUND SCATTERING IN THE UPPER LAYER AND ON THE SHELF OF THE NORTH- WEST PACIFIC OCEAN	10
<i>Bulanov V.A., Korskov I.V.</i> ACOUSTIC NONLINEARITY OF THE UPPER OCEAN LAYER	28
<i>Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V.</i> PECULIARITIES OF HYDROACOUS- TIC WAVE PROPAGATION ON A WEDGE SHELF	50
<i>Dorozhko V.M., Gorovoy S.V., Korenbaum V.I.</i> ON REGISTERING RESPIRA- TORY-ASSOCIATED NOISES OF SCUBA-DIVER IN SHALLOW WATER WITH BOTTOM-MOUNTED HYDROPHONES	74
<i>Kasatkin S.B.</i> IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part I	83
<i>Kasatkin S.B.</i> IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part II	101
<i>Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Tagilcev A.A., Borodin A.E.</i> DEVELOPMENT OF SMALL-SIZE LOW-FREQUENCY PRESSURE GRADIENT SENSORS	114
<i>Manul'chev D.S.</i> ENERGY PROPAGATION OF THE LOW-FREQUENCY PULSE ENERGY IN VITYAZ BAY	125
<i>Pivovarov A.A., Yaroshchuk Y.O., Samchenko A.N., Shvyrev A.N.</i> AN AUTO- NOMOUS LOW-FREQUENCY BROADBAND HYDROACOUS- TIC EMITTING STATION	135
<i>Rutenko A.N., Ushchipovskii V.G., Radaev I.R.</i> ACOUSTIC SIGNALS GENERATED BY SNAPPING SHRIMP IN VITYAZ BAY	142
<i>Salomatin A.S.</i> THE BUBBLE SEEPAGE AREAS IN THE TATAR STRAIT OF THE JAPAN SEA.....	155
<i>Samchenko A.N., Pivovarov A.A., Shvyrev A.N., Yaroshchuk I.O.</i> EXPERI- MENTAL STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF VARIOUS SPECIES OF SEISMOACOUSTIC WAVES IN THE COASTAL ZONE	168
<i>Fedorovskiy A.S.</i> NEW OPPORTUNITIES FOR RIVER EXPLORATION WITH UAV	177

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	9
<i>Буланов В.А., Корсков И.В., Стороженко А.В.</i> О РАССЕЙЯНИИ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ И НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА	10
<i>Буланов В.А., Корсков И.В.</i> АКУСТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА	28
<i>Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.</i> ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕН- НИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА КЛИНОВИДНОМ ШЕЛЬФЕ	50
<i>Дорожко В.М., Горовой С.В., Коренбаум В.И.</i> О РЕГИСТРАЦИИ ШУМОВ ДЫХАНИЯ ВОДОЛАЗА-АКВАЛАНГИСТА В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ РАЗМЕЩЕННЫМИ У ДНА ГИДРОФОНАМИ	74
<i>Касаткин С.Б.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОР- МИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИН- ФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть I	83
<i>Касаткин С.Б.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОР- МИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИН- ФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть II	101
<i>Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., Бородин А.Е.</i> РАЗРА- БОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА	114
<i>Манульчев Д.С.</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ НИЗКОЧАСТОТ- НОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В БУХТЕ ВИТЯЗЬ	125
<i>Пивоваров А.А., Яроцук И.О., Самченко А.Н., Швырев А.Н.</i> АВТО- НОМНАЯ НИЗКОЧАСТОТНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СТАНЦИЯ	135
<i>Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г., Радаев И.Р.</i> АКУСТИЧЕСКИЕ СИГ- НАЛЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ РАКОМ-ЩЕЛКУНОМ В Б. ВИ- ТЯЗЬ	142
<i>Саломатин А.С.</i> ЗОНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ	155
<i>Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Яроцук И.О.</i> ЭКСПЕ- РИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ	168
<i>Федоровский А.С.</i> НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕК С ПОМОЩЬЮ БПЛА	177

PREFACE

The All-Russian symposium “Physics of Geospheres” is held every two years and the eleventh took place in 2019. The subject of the symposium covers and connects practically all areas of scientific research of V.I. Il’ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS. which are concentrated in the following sections: 1. Contemporary methods and tools for monitoring and tomography of transition zones; 2. Geological and geophysical structure of transition zones (experimental and model-theoretical studies); 3. Modelling of seismoacoustic-hydrophysical processes of transition zones. The main idea of the symposium is that any processes, occurring in one of the geospheres cannot be considered in isolation from the processes, occurring in neighboring geospheres. In order to study the causes of the occurrence and development of various geosphere processes, it is necessary to monitor simultaneously in all geospheres in the infrasonic and sound ranges. Part of such monitoring is devoted to hydroacoustic methods and means, which cover almost the entire sound and partly high-frequency infrasonic ranges. The hydroacoustic direction is the most important one, focused on obtaining world-class fundamental and applied results.

At the same time, one should not forget about the possible impact on the spatio-temporal structure of hydroacoustic fields of different-scale hydrophysical fields, as indicated in separate sections of some articles of the collection. Investigation of these effects is connected with the hope of tracking variations in the main parameters of hydrophysical fields according to the peculiarities of changes in the spatio-temporal structure of artificially created hydroacoustic fields. The results of research, related to the study of the regularities of the transformation of hydroacoustic into seismoacoustic waves are extremely important for understanding the behavior of more low-frequency waves during their transformation at the boundaries of geospheres.

Some of these results are presented in the articles of this collection, the subject of which is entirely devoted to the hydroacoustic direction, which plays a major role in the study of various multi-scale geosphere processes and phenomena.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Всероссийский симпозиум «Физика геосфер» проводится раз в два года и в 2019 году состоялся одиннадцатый. Тематика симпозиума практически охватывает и связывает все направления научных исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, которые сконцентрированы в следующих разделах: 1. Современные методы и средства мониторинга и томографии переходных зон; 2. Геолого-геофизическая структура переходных зон (экспериментальные и модельно-теоретические исследования); 3. Моделирование сейсмоакустико-гидрофизических процессов переходных зон. Основная идея симпозиума связана с тем, что любые процессы, происходящие в одной из геосфер, нельзя рассматривать в отрыве от процессов, происходящих в соседних геосферах. С целью изучения причин возникновения и развития различных геосферных процессов необходимо проводить мониторинг одновременно во всех геосферах в инфразвуковом и звуковом диапазонах. Часть такого мониторинга отводится гидроакустическим методам и средствам, закрывающим практически весь звуковой и частично высокочастотный инфразвуковой диапазоны. Гидроакустическое направление является важнейшим направлением, ориентированным на получение фундаментальных и прикладных результатов мирового уровня.

При этом нельзя забывать о возможном воздействии на пространственно-временную структуру гидроакустических полей разномасштабных гидрофизических полей, на что указано в отдельных разделах некоторых статей сборника. Исследование данных эффектов связано с надеждой отслеживания вариаций основных параметров гидрофизических полей по особенностям изменения пространственно-временной структуры искусственно созданных гидроакустических полей. Результаты исследований, связанные с изучением закономерностей трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические, крайне важны для понимания поведения более низкочастотных волн при их трансформации на границе геосфер.

Некоторые такие результаты приведены в статьях настоящего сборника, тематика которого целиком отведена гидроакустическому направлению, играющему важнейшую роль при исследовании разномасштабных геосферных процессов и явлений.

О РАССЕЯНИИ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ И НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Буланов В.А., Корсков И.В., Стороженко А.В.

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток*

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований рассеяния звука в верхнем слое морской воды в северо-западной части Тихого океана. Измерения коэффициентов рассеяния звука проводились на различных частотах от 12 до 100 кГц на шельфе и в открытом океане. Исследования представляли интерес в связи с возможностью оперативно в процессе движения судна проводить мониторинг изменчивости структуры морской среды. Проведение долговременных исследований рассеяния звука на планктоне и других микронеоднородностях морской среды в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря с применением акустических донных систем позволило определить вариации рассеяния звука, связанного с наличием пузырьков и суточных вариаций планктона в толще моря. Показаны возможности и проведены оценки биомассы вдоль длинных трасс в различных морях северо-западной части Тихого океана на основе рассеяния звука.

Ключевые слова: рассеяние звука, верхний слой океана, планктон, пузырьки, внутренние волны.

ON SOUND SCATTERING IN THE UPPER LAYER AND ON THE SHELF OF THE NORTH-WEST PACIFIC OCEAN

Bulanov V.A., Korskov I.V., Storozhenko A.V.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

Abstract

The results of studies of sound scattering in the upper layer of sea water in the North-Western Pacific Ocean are presented. Sound scattering coefficients

were measured at various frequencies from 12 to 100 kHz on the shelf and in the open ocean. The research was of interest because it was possible to monitor the variability of the marine environment structure quickly during the ship's movement. Long-term studies of sound scattering on plankton and other micro-heterogeneities of the marine environment in Vityaz Bay, Peter the Great Bay, Sea of Japan, using acoustic bottom systems, allowed us to determine variations in sound scattering associated with the presence of bubbles and diurnal variations of plankton in the sea column. The possibilities of biomass along long trails in various seas of the North-West Pacific Ocean based on sound scattering are shown and estimated.

Keywords: sound scattering, upper ocean layer, plankton, bubbles, internal waves.

Введение

Наиболее изменчивым слоем водной толщи океана является верхний слой. Для этого слоя характерно сосредоточение биоресурсов и наличие интенсивных динамических процессов [1, 5, 10, 12, 17]. Взаимодействие океан – атмосфера оказывает сильное влияние на динамику приповерхностных вод и их структуру. Приповерхностный слой характеризуется развитой турбулентностью, аномально высокими концентрациями газовых пузырьков, которые приводят к повышенному рассеянию и поглощению звука, а также к усилению масс и газообмена между океаном и атмосферой [5, 9, 14, 16, 24]. Исследования рассеяния звука позволяют изучать мелкомасштабную структуру морской среды и ее изменчивость. В приповерхностном слое моря резко выражены флуктуации гидрофизических характеристик, связанных с пузырьковыми структурами, образующимися при обрушении ветровых волн [2, 4, 13–16]. Эти пузырьковые облака, как правило, модулируются по концентрации поверхностными волнами, что в итоге приводит к специфическим эффектам при рассеянии и распространении звука [18, 23, 24].

Большую роль в рассеянии звука играют планктонные сообщества, и в первую очередь с позиции иерархии сечения рассеяния звука одиночным объектом выступает особь зоопланктона [1, 11, 17, 20, 25]. Фитопланктон рассеивает звук существенно слабее, однако наличие его в больших количествах порой создает конкуренцию зоопланктону в рассеянии звука на высоких частотах [1, 9, 17, 20].

Аномальное рассеяние звука на планктоне и других микронеоднородностях, локализованных вблизи термоклина, позволяет получать информацию о различных гидрофизических процессах в море – внутренних волнах, течениях и крупномасштабной турбулентности [1, 4, 15, 23, 24].

При развитии волнения моря всегда наблюдается повышенное рассеяние звука, обусловленное газовыми пузырьками, вовлеченными в толщу морской воды динамикой движений в поверхностных волнах. Одновременно в верхнем слое моря наблюдается повышенное рассеяние звука, связанное с наличием планктона. Зачастую в приповерхностном слое одновременно находятся облака пузырьков и мощные скопления планктона, тогда возникает проблема идентификации акустических сигналов, рассеянных отдельными пузырьками и особями планктона [4, 13, 22, 23].

Изучение рассеяния звука в верхнем слое океана имеет важное значение для развития методов оперативной океанологии, т.к. позволяет по аномальному рассеянию звука на планктоне и других микронеоднородностях, локализованных вблизи термоклина, получать информацию о различных крупномасштабных нестационарных гидрофизических процессах в море – внутренних волнах, течениях и крупномасштабной турбулентности, которые имеют связь с положением и характеристиками термоклина. В сущности, можно использовать особенности динамики звукорассеивающих слоев для оценки характера процессов в толще океана.

Ниже представлены результаты исследований по рассеянию звука на различных частотах для изучения детальной структуры и динамики верхнего слоя моря с высоким пространственным и временным разрешением.

Рассеяние звука на планктоне

Акустический метод зондирования океана, основанный на измерениях обратного рассеяния звука, является примером дистанционного метода, позволяющего оперативно изучать структуру водной среды океана. Имея информацию об амплитудах падающей на объем V волны P_i и рассеянной в обратном направлении P_{bs} , можно определить коэффициент объемного рассеяния m_V [1, 4, 5, 8]:

$$m_V = \frac{2}{\pi\theta^2 c\tau} \left(\frac{P_{bs}}{P_i} \right)^2, \quad (1)$$

где V_{imp} – импульсный рассеивающий объем среды, $V_{imp} = \pi r^2 \theta^2 c\tau / 2$, θ – ширина характеристики направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длительность импульса звука. С другой стороны, коэффициент объемного рассеяния звука m_V в приближении однократного рассеяния (борновском приближении) определяется выражением, учитывающим функцию распределения по размерам $g(R)$ и сечение рассеяния $\sigma(R, \omega)$ одиночным включением в виде

$$m_V = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \sigma(R, \omega) g(R) dR. \quad (2)$$

Имея функцию распределения по размерам $g(R)$ и плотность включений в различных точках пространства $\rho'(r)$, можно определить концентрацию биомассы по формуле [3,4]

$$m_g(r) = (4\pi / 3) \int_{R_{min}}^{R_{max}} \rho'(r) R^3 g(R, r) dR. \quad (3)$$

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. появились модели [1, 11, 20, 25], которые позволяют оценить коэффициент рассеяния звука как планктоном малого размера, так и большим зоопланктоном и рыбами.

Количественно связь размеров R и концентрации зоопланктона при $R < 1$ см была впервые получена Цейтлиным [10] для организмов, обитающих в тропических биологически бедных и биологически богатых районах океана, которые выражаются степенной функцией распределения по размерам $g(R) \sim R^{-n}$, где $n \approx 3.7$. В случае $R > 1$ см, т.е. при больших размерах зоопланктона, $g(R)$ имеет вид функции с максимумом при некотором размере \bar{R} , который может быть ярко выраженным или несколько размазан в интервале размеров Δ в зависимости от вида зоопланктона. Здесь наиболее распространенной является Гауссовская модель. Общее выражение, позволяющее получать данные по распределению биомассы в рамках степенного P и Гауссовского G распределений, имеет вид [3, 4]:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_V(r, f), \quad (4)$$

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ равен

$$D^{(P,G)}(f) = \begin{cases} \frac{4\pi\rho'}{3(4-n)} \frac{R_{\max}^{4-n}}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R, f) R^{-n} dR}, & g^{(P)} \sim R^{-n} \\ \frac{4\pi\rho'}{3} \frac{\bar{R}^3}{\sigma_1(\bar{R}, f)}, & g^{(G)} \sim e^{\left[-\frac{(R-\bar{R}(r))^2}{\Delta^2}\right]} \end{cases} \quad (5)$$

Следует обратить внимание на зависимость от частоты f , которая появляется в формулах (4), (5) через частотную зависимость сечения рассеяния на одиночном включении $\sigma_1(R, f)$.

Результаты исследований рассеяния звука в Тихом океане

Целенаправленные эксперименты по изучению рассеяния звука в верхнем слое океана в ТОИ ДВО РАН проводились на НИС «Акад. А. Виноградов». Схема экспедиций представлена на рис. 1, а. На рис. 1, б представлена картина рассеяния звука на частоте 12 кГц вдоль трассы в северной части Южно-Китайского моря. Одновременно с пространственной изменчивостью рассеяния звука наблюдались суточные вариации звукорассеивающих слоев, которые в темное время суток поднимаются к поверхности.

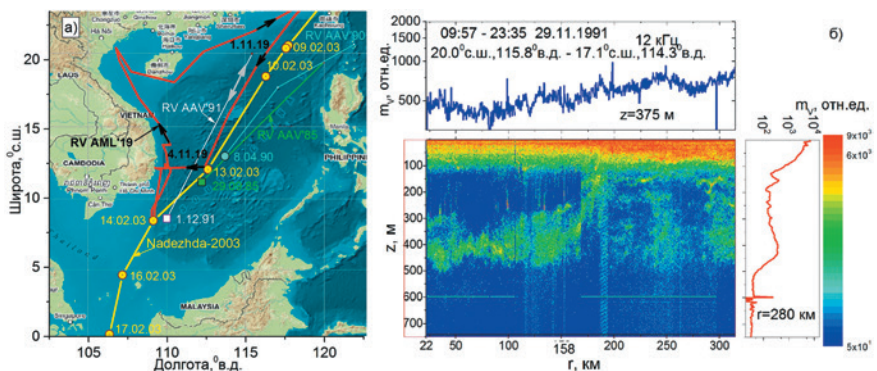


Рис. 1. а) схема маршрутов экспедиций, в которых проходили исследования по рассеянию звука в Южно-Китайском море; б) рассеяние звука на частоте 12 кГц на звукорассеивающих слоях в Южно-Китайском море

В 2003 и 2004 гг. в Южно-Китайском море были проведены исследования рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль маршрута следования парусного судна «Надежда», совершающего кругосветную экспедицию. Осенью 2019 г. в 88 рейсе НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» были проведены исследования рассеяния звука на частоте 25 кГц. На рис. 2, а представлена картина рассеяния звука в верхнем слое, полученная на судне «Надежда» в 2003 г. в глубоководной части Южно-Китайского моря. На рис. 2, б представлено распределение коэффициента рассеяния звука m_V на частоте 25 кГц вдоль протяженной трассы 396 км в центральной части Южно-Китайского моря. На правом графике рис. 2, б – $m_V(z)$ при $r = 113$ км, вверху – $m_V(r)$ на различных глубинах: 1 – $z = 80$ м, 2 – $\langle m_V(r) \rangle$ по глубине от 0 до 200 м, 3 – $z = 920$ м.

Из рис. 2 видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука, которые связаны с суточными перемещениями по глубине планктона и рыбы. На частоте 25 кГц удается получить данные по рассеянию звука на биологических объектах до значительных глубин более 1 км непосредственно на ходу судна.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль трассы длиной около 900 км в водах Охотского моря [3, 4]. Видны суточные вариации m_V , достигающие 20 дБ, наложенные на тренд m_V , достигающий 5–6 дБ. Основные суточные вариации m_V для Охотского и Южно-Китайского моря в среднем

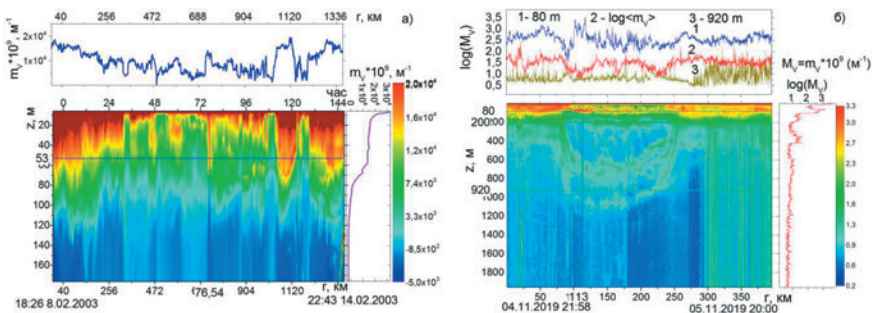


Рис. 2. Коэффициент рассеяния звука m_V на различных частотах в центральной части Южно-Китайского моря: а) на частоте 100 кГц вдоль трассы в феврале 2003 г.; б) на частоте 25 кГц в ноябре 2019 г.

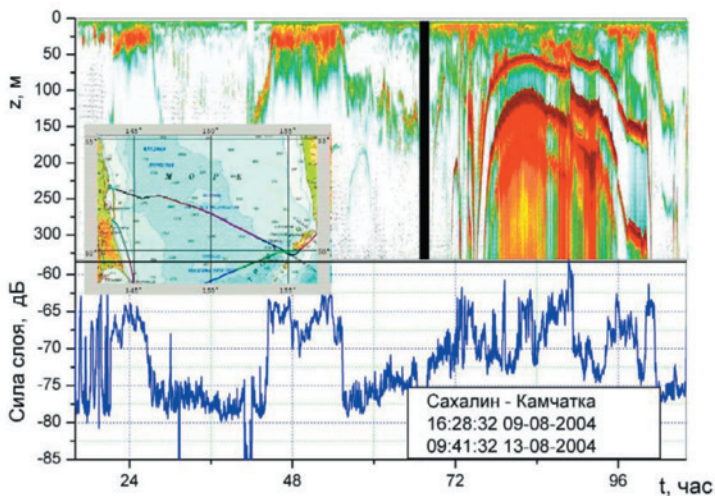


Рис. 3. Распределение рассеяния звука вдоль трасс в Охотском море

схожи на частоте 100 кГц, но отличаются по сравнению с частотой 25 кГц, для которой суточная изменчивость рассеяния звука достигает больших глубин 1000–1200 м.

Важным вопросом для развития методов оперативной океанологии является вопрос о пространственном разрешении и выборе частот излучаемого звука в методе акустического зондирования для оперативного изучения океанологических фронтов. В экспедиции 88 рейса НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» в 2019 г. были записаны сигналы рассеяния звука на частоте 19.5 кГц при пересечении в Японском море фронтального раздела, отделяющего субарктические водные массы от субтропических. На рис. 4, а видно, что вблизи точки с координатами 39.20N 130.77E звукорассеивающий слой с глубины около 50 м резко заглубляется на глубину 150–200 метров. Далее везде вдоль маршрута ниже параллели 39.20N в теплых субтропических водных массах звукорассеивающий слой в глубоком море располагался на глубинах около 200 метров и ниже. Интересно сравнить картину рассеяния звука при переходе через фронтальный раздел, полученную в зимний период на другой частоте 100 кГц в период кругосветной экспедиции на паруснике «Надежда» в 2003 г. Из рис. 4, а и рис. 4, б

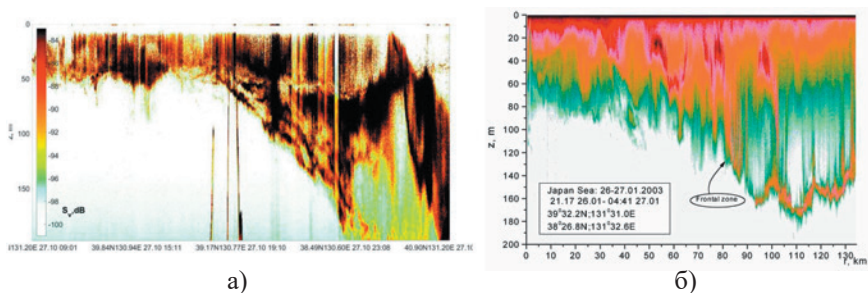


Рис. 4. Рассеяние звука на различных частотах при переходе через фронт в Японском море: а) на частоте 19,5 кГц в осенний период; б) на частоте 100 кГц в зимний период

видно, что в результате на различных частотах и в различные сезоны удастся отследить положение фронтального раздела, отделяющего субарктические водные массы от субтропических. Несмотря на различие в частотах и время года, наблюдается очень яркая контрастность в структуре рассеяния звука, что позволяет непосредственно на ходу судна с большим пространственным разрешением отследить детали фронтального раздела.

Акустическая оценка концентрации планктона

Полученные данные для коэффициента рассеяния звука с помощью формулы (4), (5) могут быть использованы для оценки концентрации планктона. Коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ имеет сложный вид, например, для частоты $f \sim 100$ кГц можно получить $D^{(P)} \sim 2 \cdot 10^2$ г·м/л [4]. Приведенная оценка в дальнейшем использована для оценки распределения биомассы в верхнем слое моря.

На рис. 5 представлены сравнительные акустические оценки концентрации планктона, полученные в 2003–2004 гг. в кругосветной экспедиции на судне «Надежда», а также в ноябре 2019 г. в 88 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Видно, что в открытом океане средняя концентрация планктона примерно одинакова в различных районах, включая суточные вариации концентрации планктона в открытых частях океана. Концентрация планктона возрастает вблизи островов в тропической части океана и в окраинных морях, что

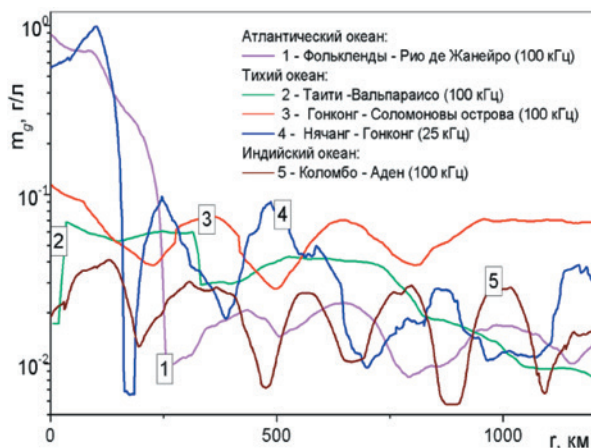


Рис. 5. Концентрация планктона по данным о рассеянии звука для различных районов Мирового океана (по данным кругосветной экспедиции на ПУС «Надежда» в 2003–2004 гг., кривые 1, 2, 3, 5 – фрагменты одной и той же протяженностью для трасс с переменной длиной) и данных НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» в 2019 г. (кривые 5)

согласуется с результатами различных авторов [1, 10, 11, 17]. Полученные зависимости, связывающие коэффициент рассеяния звука m_v и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их для оперативного акустического мониторинга биоресурсов на ходу судна.

Рассеяние звука на шельфе Японского моря

При развитии волнения всегда наблюдается повышенное рассеяние звука, обусловленное газовыми пузырьками, вовлеченными в толщу морской воды динамикой движений в поверхностных волнах [4, 5]. Одновременно в верхнем слое моря наблюдается повышенное рассеяние звука, связанное с наличием планктона [2, 3]. Ниже представлены результаты изучения детальной структуры и динамики верхнего слоя моря с высоким пространственным и временным разрешением. Проведение долговременных исследований рассеяния звука на планктоне и других микронеоднородностях морской среды в бухте

Витязь залива Петра Великого Японского моря с применением акустических донных систем позволило определить вариации рассеяния звука, связанного с наличием пузырьков и суточных вариаций планктона в толще моря [3,4]. Удалось также провести детальные морские исследования при различных погодных условиях. Были подготовлены акустические донные системы с инвертированными высоконаправленными эхолотами для исследований в верхнем слое моря, которые установлены в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря. Это позволило получить новые данные о суточных вариациях коэффициента рассеяния звука и связанных с ними вариациях распределения биомассы в форме зоо- и фитопланктона в толще моря.

В бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря были установлены две акустические донные системы на небольшом разнесении около 20 метров на глубинах около 10–12 метров с инвертированными высоконаправленными эхолотами на частотах в интервалах 54–64 кГц, 110–126 кГц, 138 кГц [7]. Одна донная система состоит из двух акустических преобразователей с рабочей частотой 60 кГц, направленных под углом 25 градусов относительно друг друга. Другая донная система состоит из трехэлементного широкополосного направленного излучателя и приемного гидрофона, установленных на дно с направлением излучения вертикально вверх. На рис. 6 показана функциональная схема донных систем. Схема позволяет проводить исследования рассеяния звука путем коммутации акустических излучателей и приемников в различных сочетаниях. Режимы излучения

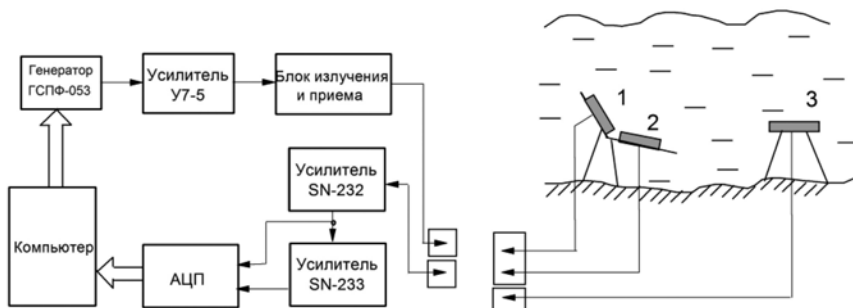


Рис. 6. Функциональная схема донных систем: 1, 2 – акустические излучатели двухэлементной акустической системы, 3 – акустический трехэлементный излучатель

программируются цифровым генератором сигналов специальной формы (ГСПФ-053), усиливаются и передаются на выбранный излучатель. Тракт приема позволяет вести регистрацию сигналов рассеяния как в узком диапазоне частот селективным усилителем SN-233, так и в широком диапазоне усилителем SN-232.

Исследования рассеяния звука на звукорассеивающих структурах в различные сезоны позволили идентифицировать объекты рассеяния (планктон, пузырьковые облака, рассеяние, связанное с динамикой внутренних волн) и получить новые данные о сезонных и суточных вариациях коэффициента рассеяния звука в толще моря [3, 4].

В качестве примера на рис. 7 представлено акустическое изображение приповерхностных пузырьковых облаков по мере их развития с усилением ветра и одновременное рассеяние звука на зоопланктоне, визуализирующее внутренние волны большой амплитуды, полученное с применением донных акустических систем. На рис. 8 показаны типичные летние коэффициенты объемного рассеяния, полученные на частоте 138 кГц в августе в течение нескольких дней. Серым цветом на оси времени везде на рисунках отмечен ночной период. Из ре-

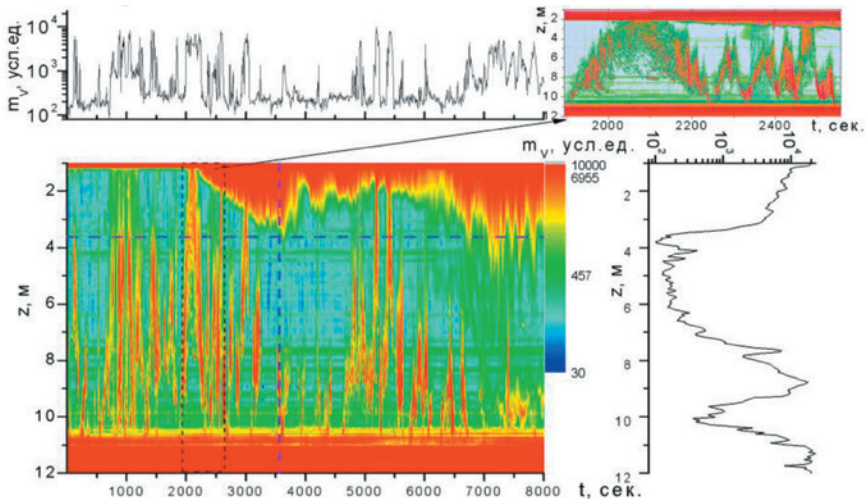


Рис. 7. Характер рассеяния звука на пузырьковых облаках по мере их развития и одновременное рассеяние звука на зоопланктоне, визуализирующие внутренние волны большой амплитуды

зультатов, представленных на рис. 8, видно, что основное рассеяние звука в море связано со сгущениями планктона, которые испытывают суточные изменения своей структуры. Одновременно можно видеть, что в приповерхностном слое моря всегда наблюдается повышенная концентрация воздушных пузырьков, которая особенно сильно увеличивается при сильном ветре и волнении.

По частотной зависимости коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ может быть найдена функция распределения пузырьков по размерам $g(R)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [2, 4, 22]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2}{\pi R^3(\omega) Q_\omega} m_V(\omega), \quad R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega, \quad (6)$$

где Q_ω – добротность пузырьков на циклической частоте $\omega = 2\pi f$.

Полученные данные позволили получить функции распределения пузырьков по размерам, которые на рис. 9 показаны для пузырьков,

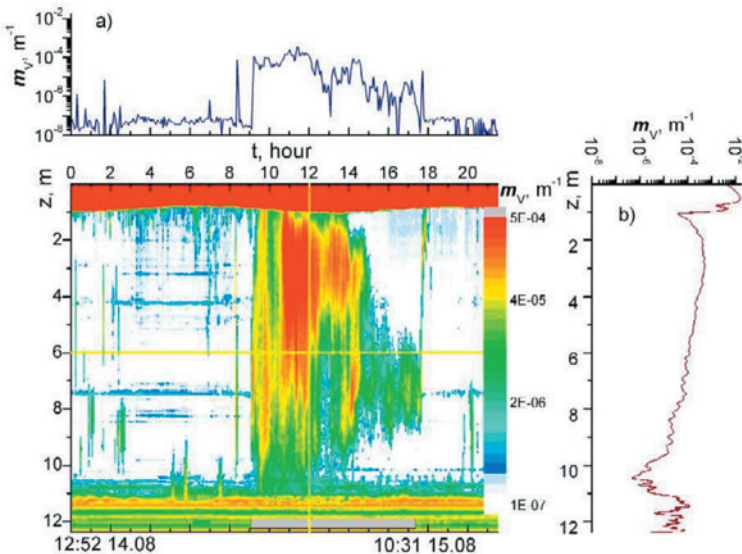


Рис. 8. Изменения коэффициента объемного рассеяния звука с частотой 138 кГц на зоопланктоне с 12:52 14 августа по 10:31 15 августа

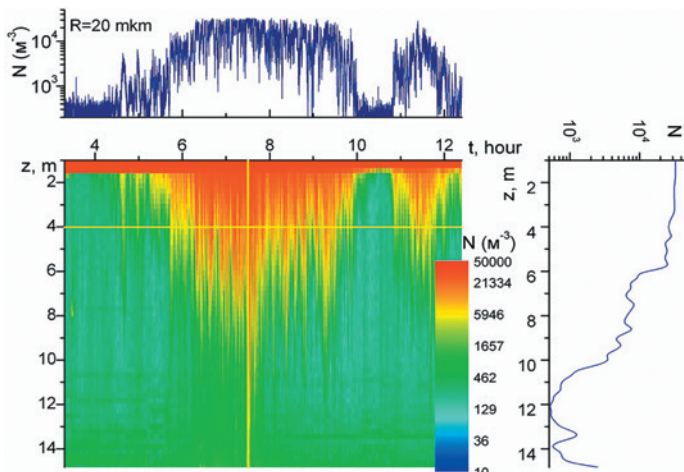


Рис. 9. Изменчивость концентрации пузырьков в пузырьковых облаках – функции $N(t, z)$, сверху и справа – горизонтальный ($z = 3$ м) и вертикальный профили $N(t, z)$

резонансных на частоте 138 кГц на различных глубинах в различные временные периоды развития шторма. Кривые сверху и справа от рисунка соответствуют положению курсора на центральном рисунке. Из рис. 9 видно, что с усилением ветра происходит существенное вовлечение пузырьков в толщу моря. Полученные экспериментальные результаты позволили аппроксимировать распределение пузырьков сравнительно простой функцией $g(R)$ вида:

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp \left[-n \left(\frac{R_p}{R} - 1 \right) - \frac{R}{R_m} \right]. \quad (7)$$

В формуле (7) показатель степени n и критические размеры R_p (максимум $g(R)$), R_m (спад $g(R)$ при больших R) являются естественными параметрами, которые следуют из теории Гаррета – Фармера в инерционном интервале между размерами R_p, R_m [19]. При этом оказывается, что величина $n \sim 3.3$, хотя при измерениях $g(R)$ на большом фактическом материале в умеренных состояниях моря оказывается $n \sim 3.5-3.8$. [3,6].

На рис. 10 показана типичная временная и спектральная характеристика динамики планктона в течение половины суток, выполняющего

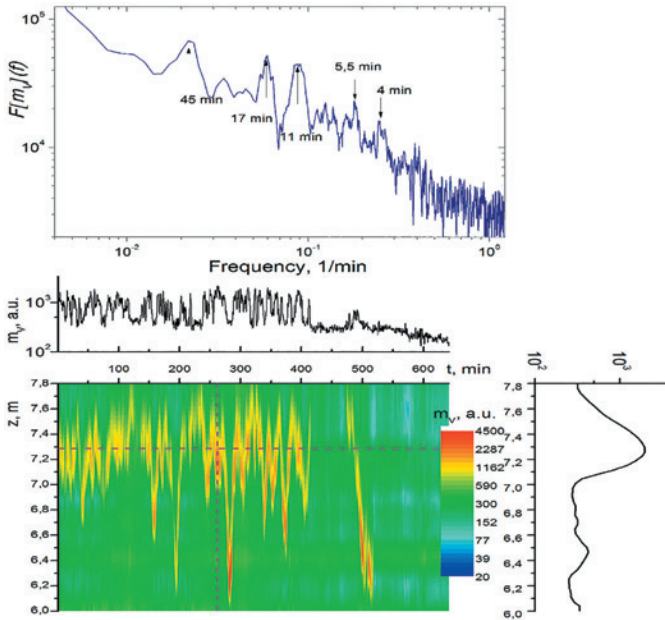


Рис. 10. Динамика планктона, выполняющего роль трассера внутренних волн с наиболее ярко выраженными периодами 45 мин, 17 мин, 11 мин.

роль трассера внутренних волн с наиболее ярко выраженными периодами. Из рис. 10 можно выявить наиболее характерные периоды в 11, 17 и 45 минут, которые могут быть связаны с характерными периодами собственных колебаний бухты Витязь, которые модулируют коэффициент рассеяния звука на планктоне в толще моря.

Заключение

Обсуждены результаты исследований рассеяния звука на различных частотах от 12 до 100 кГц на шельфе и в открытом океане в верхнем слое морской воды в северо-западной части Тихого океана. Представлены типичные вариации коэффициента объемного рассеяния звука вдоль протяженных трасс, располагающихся в различных морях северо-западной части Тихого океана. Применение акустических донных систем в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря позволило провести долговременные исследования рассеяния звука,

связанного с наличием пузырьков, а также суточных вариаций планктона в толще моря. Применение донных акустических систем позволяет эффективно разделить вклад в рассеяние звука, обусловленный наличием планктона и воздушных пузырьков, и позволяет дать независимую оценку газосодержания и концентрации планктона в верхнем слое моря. Показано, что данные по рассеянию звука позволяют оценить концентрацию пузырьков, а также важную характеристику биопродуктивности вод – массовую концентрацию включений и их суммарное количество в интервале размеров. Показаны возможности и проведены оценки биомассы вдоль длинных трасс в различных морях северо-западной части Тихого океана на основе рассеяния звука.

Благодарность. Работа выполнена по госзаданию № 0271-2019-0009 и частично поддержана грантами РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний Восток» № 18-И-004.

Литература

1. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.
2. Акуличев В.А., Буланов В.А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Докл. АН. 2012. Т. 446. № 2. С. 212–215.
3. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. Акустические исследования зоопланктона в Японском море и восточной Арктике // Докл. АН. 2016. Т. 470. № 2. С. 219–222. DOI:10.7868/S0869565216260145
4. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2017. 414 с. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 264 с.
6. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронесодородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука. 2001. 281 с.
7. Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко С.Н., Стороженко А.В. Система многочастотного акустического зондирования для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167.
8. Исмару И. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир. 1981. Т. 1, 2.
9. Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А., Крупаткина Д.К. Газовые пузырьки и морской фитопланктон. Ультразвуковые реверберационные измерения // Океанология. 1992. Т. 32. № 1. С. 92–100.

10. Цейтлин В.Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // *Океанология*. 1981. Т. 21. № 1. С. 125–131.
11. Andreeva I.B., Belousov A.V., Multiple sound scattering by densely packed shoals of marine animals // *ICES Journal of Marine Science*. 1996. Vol. 53. P. 323–327.
12. Andreas E.L., Monahan E.C. The role of whitecap bubbles in air-sea heat and moisture exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. P. 433–441.
13. Akulichiev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. No 5. Pt. 2. P. 3438–3449.
14. Babanin V. Breaking of ocean surface waves. // *Acta Physica Slovaca*. 2009. Vol. 59. No 4. P. 305–535.
15. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. No 1. P. 241–245.
16. Deane G.B., Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. Vol. 102. P. 2671–2689.
17. Chapman R., Bluy R., Adlington A., et al. Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and Adjacent Seas // *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. No. 6. P. 1722–1734.
18. Farmer D.M., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp. DOI: 10.1029/2009jc005990.
19. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // *J. Phys. Ocean.* 2000. Vol. 30. No 9. P. 2163–2171.
20. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. Vol. 138. No 6. P. 3742–3764.
21. Lei Han, YeLi Yuan. Bubble size distribution in surface wave breaking entraining process // *Science in China. Series D: Earth Sciences*. 2007. Vol. 50. No 11. P. 1754–1760.
22. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. Vol. 62. P. 1041–1044.
23. Thorpe S.A. Measurements with an automatically recording inverted echo sounder; ARIES and the bubble clouds // *J. Phys. Oceanography*. 1986. Vol. 16. P. 1462–1478.
24. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
25. Weibe P., Greene C., Stanton T.. Sound scattering by live zooplankton and micronecton // *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. Vol. 88. No 5. P. 2346–2359.

References

1. Andreeva I.B. Zvukorasseyvajushhie sloi – akusticheskie neodnorodnosti tolshhi vod okeana // *Akust. zhurn.* 1999. Vol. 45. No 4. P. 437–444.

2. Akulichev V.A., Bulanov V.A. O spektre puzyr'kov gaza i vozmozhnostyah akusticheskoy spektroskopii v pripoverhnostnom sloe okeana // *Doklady Akademii nauk*. 2012. Vol. 446. No 2. P. 212–215.
3. Akulichev V.A., Bulanov V.A., Storozhenko A.V. Akusticheskie issledovaniya zoolplanktona v Japonskom more i vostochnoj Arktike // *Doklady Akademii nauk*. 2016. Vol. 470. No 2. P. 219–222. DOI:10.7868/S0869565216260145.
4. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Akusticheskie issledovaniya melkomasshtabnyh neodnorodnostej v morskoy srede. Vladivostok: TOI DVO RAN. 2017. 414 p. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
5. Brehovskih L.M., Lysanov Ju.P. *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana*. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 264 p.
6. Bulanov V.A. *Vvedenie v akusticheskuyu spektroskopiju mikroneodnorodnyh zhidkostej*. Vladivostok: Dal'nauka. 2001. 281 p.
7. Bulanov V.A., Korskov I.V., Sosedko S.N., Storozhenko A.V.. Sistema mnogochasotnogo akusticheskogo zondirovaniya dlja issledovaniya akusticheskikh harakteristik verhnego sloja morja // *Pribory i tehnika jeksperimenta*. 2020. No 3. P. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167.
8. Isimaru I. *Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnyh sredah*. M.: Mir. 1981. Vol. 1, 2.
9. Sandler B.M., Selivanovskij D.A., Stunzhas P.A., Krupatkina D.K. Gazovye puzyr'ki i morskoy fitoplankton. Ul'trazvukovye reverberacionnye izmereniya // *Okeanologija*. 1992. Vol. 32. No 1. P. 92–100.
10. Cejtlin V.B. Razmernoe raspredelenie pelagicheskikh organizmov v tropicheskikh rajonah okeana // *Okeanologija*. 1981. Vol. 21. No 1. P. 125–131
11. Andreeva I.B., Belousov A.V., Multiple sound scattering by densely packed shoals of marine animals // *ICES Journal of Marine Science*. 1996. Vol. 53. P. 323–327.
12. Andreas E.L., Monahan E.C. The role of whitecap bubbles in air–sea heat and moisture exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. P. 433–441.
13. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. No 5. Pt. 2. P. 3438–3449.
14. Babanin V. Breaking of ocean surface waves // *Acta Physica Slovaca*. 2009. Vol. 59. No 4. P. 305–335.
15. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. No 1. P. 241–245.
16. Deane G.B., Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1997. Vol. 102. P. 2671–2689.
17. Chapman R., Bluy R., Adlington A., et al. Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and Adjacent Seas // *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. Vol. 56. No. 6. P. 1722–1734.
18. Farmer D.M., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp. DOI: 10.1029/2009jc005990.

19. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // *J. Phys. Ocean.* 2000. Vol. 30. No 9. P. 2163–2171.
20. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic back-scattering used in aquatic ecosystem research // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. Vol. 138. No 6. P. 3742–3764.
21. Lei Han, YeLi Yuan. Bubble size distribution in surface wave breaking entraining process // *Science in China. Series D: Earth Sciences.* 2007. Vol. 50. No 11. P. 1754–1760.
22. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. Vol. 62. P. 1041–1044.
23. Thorpe S.A. Measurements with an automatically recording inverted echo sounder; ARIES and the bubble clouds // *J. Phys. Oceanography.* 1986. Vol. 16. P. 1462–1478.
24. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weekly soluble gases nitrogen and oxygen // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
25. Weibe P., Greene C., Stanton T. Sound scattering by live zooplankton and micronecton // *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. Vol. 88. No 5. P. 2346–2359.

АКУСТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА

Буланов В.А., Корсков И.В.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований нелинейного акустического параметра воды в верхнем слое океана. Метод измерений основан на использовании параметрической генерации звука на различных разностных частотах при бигармоническом излучении высокочастотной накачки. Измерения нелинейного акустического параметра проводились в различные годы в приповерхностном слое в северо-западной части Тихого океана, в верхнем слое до глубины 100 м в Индийском океане, а также на шельфе Японского моря, в бухте Витязь залива Петра Великого.

Ключевые слова: нелинейный акустический параметр, морская вода, пузырьки, планктон, рассеяние звука.

ACOUSTIC NONLINEARITY OF THE UPPER OCEAN LAYER

Bulanov V.A., Korskov I.V.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru

Abstract

The results of studies of the nonlinear acoustic parameter of water in the upper layer of the ocean are presented. The measurement method is based on the use of parametric sound generation at different difference frequencies under biharmonic radiation of high-frequency pumping. Measurements of the nonlinear acoustic parameter were carried out in various years in the near-surface layer in the North-Western Pacific Ocean, in the upper layer up to a depth of 100 m in the Indian ocean, as well as on the shelf of the Sea of Japan, in the Vityaz Bay of Peter the Great Bay.

Keywords: nonlinear acoustic parameter, sea water, bubbles, plankton, sound scattering.

Введение

В последнее время возникла потребность наряду с традиционными линейными методами разработки других, более совершенных методов акустической диагностики океана [1, 3–5, 7]. Таковыми оказались нелинейные методы, использующие анализ тонких эффектов рассеяния и распространения звука в микронеоднородных средах [3, 4–6, 12].

Нелинейные эффекты весьма чувствительны к присутствию микронеоднородностей в воде, поэтому наряду с непосредственным измерением параметров термодинамического состояния морской воды и скорости звука – первой производной $c = (\partial\rho/\partial P)_s^{-1/2}$ (где ρ – плотность, P – давление, s – энтропия), можно использовать параметр ε , связанный со второй производной уравнения состояния $\Gamma = \rho(\partial c^2 / \partial P)_s$, который может стать информативным признаком для диагностики морской среды. Нелинейный акустический параметр ε связан с Γ соотношением [4–6]:

$$\varepsilon = 1 + (\rho / 2) (\partial c^2 / \partial P)_s \equiv 1 + \Gamma / 2. \quad (1)$$

В жидкостях, содержащих различные фазовые включения, параметр нелинейности может значительно возрасти. Особенно сильно это проявляется для жидкостей, содержащих газовые пузырьки [3, 5–8, 12], для которых ε будет зависеть от структуры среды, а также от динамических характеристик включений. В толще морской среды дополнительно существуют различные взвеси, планктон различных размеров, микротурбулентность, которые добавляют свой вклад в нелинейность. Несмотря на важность параметра нелинейности для морской среды, информация о его измерениях в море весьма скудна [1, 3–6, 12].

Исследования нелинейного распространения звука позволяют реализовать акустическую диагностику микронеоднородностей в морской воде. По существу, речь идет о свободном не волноводном распространении звука, где основной особенностью является наличие гетерогенных и гомогенных мелкомасштабных неоднородностей. Для нелинейной акустики жидкостей наиболее важно

сочетание нелинейности и диссипации, соответствующее уравнение, описывающее нелинейные процессы в такой среде, является уравнением Бюргера [5, 6]. Эффекты дисперсии скорости звука, приводящие к уравнению Кортевега-де Вриза и сложным солитонобразным решениям, для многих ситуаций в слабонеоднородной нелинейной жидкости могут быть опущены [5]. Поскольку речь идет о не волноводном распространении, в дальнейшем считается, что в жидкости отсутствует дисперсия скорости звука, но существенна диссипация – поглощение звука [7–9]. В работе обсуждены особенности нелинейных акустических характеристик морской воды, содержащей мелко-масштабные неоднородности.

Основа метода измерения акустической нелинейности

Важным параметром для определения ε является расстояние, на котором развиваются нелинейные эффекты, – расстояние разрыва в волне. Нелинейный акустический параметр ε непосредственно связан с решением Римана [4–6] в эволюции простых волн, согласно которому скорость распространения простой волны равна $A = A_0 + \varepsilon v$, где c_0 – адиабатическая скорость звука, v – скорость частиц в волне. Появление зависимости скорости распространения волны от ее амплитуды приводит к искажениям профиля волны вплоть до образования ударных волн. Расстояние, на котором плоская гармоническая волна перерождается в ударную волну, принято называть расстоянием разрыва r^* , которая определяется соотношением [5, 6] $r^* = 1 / \varepsilon k M$. Измеряя расстояние r^* , на котором появляются нелинейные гармоники в волне, можно определить нелинейный акустический параметр ε по формуле [2]:

$$\varepsilon = \rho A^3 / (2\pi f P_m r^*). \quad (2)$$

На практике часто используется относительный метод измерения нелинейного акустического параметра, заключающийся в предварительной калибровке измерителя в известной среде и затем вычисления ε по формуле $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (U_\Omega / U_{\Omega 0})$, где ε_0 и $U_{\Omega 0}$ – величины, соответствующие эталонному образцу [2], U_Ω – амплитуда сигнала в реальных измерениях.

Более универсальный метод, позволяющий измерять частотные особенности параметра акустической нелинейности, заключается в измерении амплитуды волн разностной частоты P_Ω и накачки P_ω на различном расстоянии r . Основа метода базируется на решении, которое было получено методом возмущения Гольдбергом [4, 5], которое может быть записано в виде:

$$\frac{v_{2\omega}}{v_\omega} = \frac{1}{2\alpha_\omega r^*} (e^{-2\alpha_\omega r} - e^{-4\alpha_\omega r}), \quad (3)$$

где $r^* = 1/\varepsilon kM$ – расстояние разрыва, α_ω – коэффициент поглощения звука на частоте ω . Из (3) видно, что амплитуда второй гармоники растет до расстояния $x_m = \ln 2 / (2\alpha_\omega)$, где имеет максимум, равный $v_{2\omega} / v_\omega = 1 / (8\alpha_\omega r^*)$, а затем резко затухает, подчиняясь экспоненциальному закону. Последнее решение справедливо, когда $\alpha_\omega r^* > 1$, т.е. когда длина затухания меньше длины разрыва. Очень часто имеет место противоположный случай, когда $\alpha_\omega r^* < 1$. Тогда решение справедливо лишь на небольших расстояниях $r < r_0 < r_m$, когда нелинейные эффекты не успевают развиться. В этом случае, используя $\alpha r \ll 1$, получается следующее простое выражение $v_{2\omega} / v_\omega = r / r^*$.

Будем рассматривать поведение волны только на линейном участке $r < r^*$, хотя влияние микронеоднородностей на эволюцию всего профиля также представляет интерес. При этом удобнее перейти к давлению $P = \rho c v$, тогда получаем

$$P_{2\omega} = (\varepsilon_{2\omega} \omega / \rho c^3) P_\omega r. \quad (4)$$

В более сложном и наиболее практически важном случае применения бигармонического сигнала с частотами ω_1 и ω_2 можно показать, что на линейном участке $r < r^*$ генерация сигнала с разностной частотой $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ описывается формулой

$$P_\Omega = (\varepsilon_\Omega / \rho c^3)_e \Omega P_\omega^2 r. \quad (5)$$

Важную роль в последнее время в гидроакустике приобретают параметрические излучатели ПИ, сочетающие широкополосность

с сохранением высокой направленности в большом диапазоне частот [4–6]. Функционирование ПИ целиком связано с величиной параметра акустической нелинейности, поэтому ПИ может быть использован для определения величины нелинейного акустического параметра [2, 3, 5, 8].

Нелинейный параметр ε определялся несколькими методами.

а) По формуле $\varepsilon = 4P_{\Omega}(r)re^{\alpha_{\Omega}r} / [D_{\Omega}R_F P_0 \ln[2\alpha R_F \gamma_E / (\Omega / \omega)]]$, справедливой для дальнего поля в режиме Берктея параметрического излучателя [2, 5] (когда зона нелинейного взаимодействия определяется сферической расходимостью пучков и затухание на частоте накачки не лимитирует размер зоны эффективного взаимодействия волн накачки), где $R_F = k_{\omega} d^2 / 8$ – параметр Фраунгофера, $D_{\Omega} = k_{\Omega} d / 4$, $\gamma_E = 1.78$ – постоянная Эйлера, $P_0 = P_{\omega_1} P_{\omega_2} / \rho c^2$.

б) В условиях, когда зона нелинейного взаимодействия определяется не сферической расходимостью пучков, а затуханием на частоте накачки, что отвечает режиму Вестервельта, нелинейный параметр ε определялся по формуле [2, 5] $\varepsilon = 2\alpha_{\omega} r P_{\Omega}(r) e^{\alpha_{\Omega} r} / [D_{\Omega}^2 P_0 [1 - \exp(2\alpha_{\omega} r)]]$, куда наряду с указанными выше величинами входит коэффициент поглощения звука на частоте накачки, предварительно измеряемый в каждом эксперименте.

Наиболее практическим методом является режим Берктея, в котором для большинства применяемых в практике ПИ в диапазоне частот накачки 100–300 кГц приходится в дальнем поле учитывать расходимость пучка бигармонической накачки при сравнительно слабом поглощении на высокой частоте, тогда можно определить нелинейный параметр по следующей формуле [2, 8]:

$$\varepsilon = A(\omega, \Omega) \frac{P_{\Omega} r}{P_{\omega_1} P_{\omega_2}}, \quad A(\omega, \Omega) = \frac{4\rho c^3}{R_{F\omega}^2 \Omega \ln(2\gamma_E N_A^{-2})}. \quad (6)$$

где P_{ω_1} , P_{ω_2} , P_{Ω} – амплитуды давления волн накачки с частотами ω_1 и ω_2 и разностной частоты Ω ($\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$, $\Omega = 2\pi F$, $F = f_1 - f_2$), $N_A = (\alpha_{\omega} R_{F\omega})^{1/2}$, $\gamma_E = 1,78$ – постоянная Эйлера, $R_{F\omega} = k_{\omega} d^2 / 8$ – длина ближней зоны на частоте ω , $k_{\omega} = \omega / c$, d – апертура излучателя.

Приведенные выше формулы являются основой для измерений параметра нелинейности морской воды. Однако иногда удается

повысить точность измерений ε за счет измерения относительных нелинейных характеристик. Введем величину K_{ef} , характеризующую эффективность генерации комбинационных частот в микро-неоднородной жидкости по отношению к чистой жидкости в виде $K_{2\omega_{ef}} = [(P_{2\omega})_e - P_{2\omega}] / P_{2\omega}$, $K_{\Omega_{ef}} = [(P_{\Omega})_e - P_{\Omega}] / P_{\Omega}$, получаем

$$K_{ef} = \frac{(\varepsilon / \rho c^3)_e - \varepsilon / \rho c^3}{\varepsilon / \rho c^3}, \quad (7)$$

где нелинейный параметр ε отвечает частотной зависимости при преобразовании либо из ω в 2ω , либо из ω_1 и ω_2 в Ω . Окончательно получаем

$$K_{ef} = \frac{(\varepsilon / \rho c^3)_e}{\varepsilon / \rho c^3} - 1 = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \left\{ \left[1 + x \left(\frac{\beta' - \beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\beta' - \mathcal{K}}{\beta} \right) \right] \right\}^{3/2} \left[1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} x \right]^{1/2} - 1, \quad (8)$$

$$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} = \frac{1}{\left[1 + x \left(\frac{\beta' - \beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\beta' - \mathcal{K}}{\beta} \right) \right]^2} \times \\ \times \left\{ \left[1 + x \left(\frac{\varepsilon' \beta'^2}{\varepsilon \beta^2} - 1 \right) \right] + \frac{1}{\varepsilon} x \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\beta'_p}{\beta^2} \left(1 - \frac{\mathcal{K}_p}{\beta'_p} \right) + \frac{\rho'}{\rho} \frac{\beta'^2}{\beta^2} \left(1 - \frac{\mathcal{K}}{\beta'} \right) \left(1 - \frac{\mathcal{K}}{\beta'} + 2 \left(\frac{\rho \mathcal{K}}{\rho' \beta'} - \frac{\beta}{\beta'} \right) \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

где β и β' – адиабатическая сжимаемость воды и включения, соответственно, в случае газа в пузырьках $\beta' = \gamma / P$. \mathcal{K} – сжимаемость включения с учетом резонансных и релаксационных эффектов, при этом $\mathcal{K}_p = \partial \mathcal{K} / \partial P$, $\beta'_p = \partial \beta' / \partial P \approx -\gamma / P^2 = -\beta' / P$. В отсутствие фазовых превращений и резонансных явлений имеем

$$K_{0ef} = \left\{ \left[1 + x \left(\frac{\varepsilon' \beta'^2}{\varepsilon \beta^2} - 1 \right) \right] \right\} \left\{ \left[1 + x \left(\frac{\beta' - \beta}{\beta} \right) \right] \right\}^{-1/2} \left[1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} x \right]^{1/2} - 1. \quad (10)$$

Зачастую изменения эффективного нелинейного параметра среды оказываются малыми. В этом случае из (8), (9) получаем

$$K_{ef} = x \left\{ \frac{\varepsilon' \beta'^2}{\varepsilon \beta^2} - 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\beta' - \beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\beta' - \mathcal{K}}{\beta} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{\beta'_p}{\beta^2} \left(1 - \frac{\mathcal{K}_p}{\beta'_p} \right) + \frac{\rho'}{\rho} \frac{\beta'^2}{\beta^2} \left(1 - \frac{\mathcal{K}}{\beta'} \right) \left(1 - \frac{\mathcal{K}}{\beta'} + 2 \left(\frac{\rho \mathcal{K}}{\rho' \beta'} - \frac{\beta}{\beta'} \right) \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

В отсутствие фазовых превращений и резонансных явлений можно получить

$$K_{0ef} = x \left[\frac{\varepsilon' \beta'^2}{\varepsilon \beta^2} - 1 - \frac{\beta' - \beta}{2\beta} + \frac{\rho' - \rho}{2\rho} \right]. \quad (12)$$

В случае твердых частиц $\beta' \ll \beta$ и тогда из (12) следует простое выражение

$$K_{0ef} = (\rho' / 2\rho - 1)x. \quad (13)$$

Таким образом, эффективность нелинейной генерации в среде с твердыми частицами связана непосредственно с плотностью частиц и их концентрацией. Замечательным является тот факт, что по наклону линейной зависимости $K_{ef}(x)$ можно получить значение плотности твердых частиц в жидкости, а по самому значению K_{ef} – получить величину объемной концентрации этих частиц.

Следует обратить внимание на то, что в случае, если в жидкости находятся газовые пузырьки, то величина K_{ef} резко изменяется по сравнению с (13). Действительно, в случае дорезонансных газовых пузырьков (низкие частоты) с размерами R меньше резонансных R_ω на данных частотах звука, имеем $\beta' \gg \beta$, $\rho' \ll \rho$ и тогда наклон зависимости $K_{ef}(x)$ резко увеличивается по сравнению с (13):

$$K_{0ef} = (\beta'^2 \varepsilon' / \beta^2 \varepsilon)x. \quad (14)$$

Таким образом, при реализации нелинейной акустической диагностики морской воды с микронеоднородностями типа твердых частиц, планктона и т.п. следует тщательно следить за наклоном зависимости $K_{ef}(x)$. Резкое увеличение наклона кривых $K_{ef}(x)$ свидетельствует о наличии газовых пузырьков. В случае, когда на опыте невозможно определить концентрационные зависимости $K_{ef}(x)$, существует большой риск получить завышенные концентрации твердых частиц по формуле (14) в том случае, если в жидкости содержится хоть небольшое количество пузырьков.

Важным является вопрос о возможности диагностирования слабоконтрастных включений в морской воде, например, фитопланктона,

медуз и т.п. В этом случае, учитывая, что $\beta' \approx \beta$ и $\rho' \approx \rho$, получаем

$$K_{0ef} = (\varepsilon' / \varepsilon - 1)x. \quad (15)$$

Из (15) видно, что для слабоконтрастных неоднородностей величина $K_{ef}(x)$ в основном зависит от разности нелинейных параметров жидкости и фазовых включений. Этот случай существенно отличается от чисто твердых и газообразных включений тем, что слабоконтрастные неоднородности не позволяют эффективно распознаваться по параметрам первого порядка (плотности, сжимаемости), но гораздо лучше видны с помощью параметра второго порядка – нелинейному акустическому параметру.

На рис. 1 показана зависимость $K_{ef}(x)$ для воды с пузырьками при различном гидростатическом давлении. Видно, что при малых значениях концентрации наблюдается линейный участок. Тем не менее, начиная с концентраций $\sim 10^{-5}$, наблюдается нелинейная зависимость от концентрации, которая имеет экстремальный характер. Так, например, при гидростатическом давлении 1 атм. наблюдается максимум зависимости $K_{ef}(x)$, затем при увеличении концентрации величина $K_{ef}(x)$ заметно уменьшается.

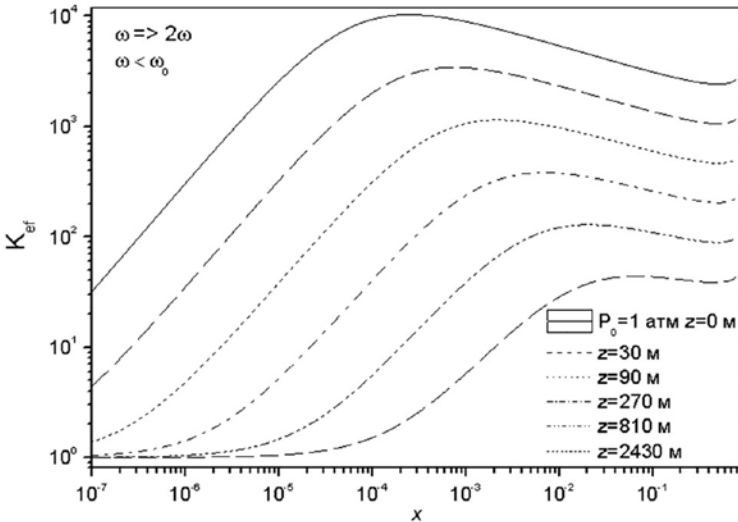


Рис. 1. Зависимость $K_{ef}(x)$ для воды с пузырьками при различном гидростатическом давлении

Таким образом, по приведенным выше формулам по методу нелинейной генерации может быть реализована акустическая диагностика микронеоднородных жидкостей. Существенным является то, что можно выделить 3 группы включений в жидкости, диагностирование которых будет проходить по различным физическим параметрам: твердые частицы – по контрасту плотностей жидкости и включений, пузырьки – по соотношению сжимаемостей жидкости и пузырьков, слабоконтрастных включений (в основном биологического происхождения) – по контрасту нелинейных параметров жидкости и включения.

Следует отметить, что приведенные формулы имеют сложный вид, величина ε_e существенно зависит не только от параметров жидкости и фазового включения, но также от функции распределения включений по размерам. Особенно большое значение это обстоятельство имеет для резонансных включений, где результат существенно будет зависеть от соотношения между частотой звука, резонансной частотой включений и их вкладом в общий эффект нелинейности. Полный вклад всех указанных параметров зависит в том числе от относительной доли включений в жидкости в пространстве размеров, т.е. в конечном итоге – от функции распределения по размерам $g(R)$.

Проводя существенные упрощения параметров микронеоднородностей и оставляя лишь резонансные характеристики и основной вклад в амплитуду рассеяния, связанную с монополярной составляющей колебаний включений, можно вычислить параметр ε , который будет зависеть от структуры среды, а также от динамических свойств включений. Окончательно величина ε определяется в виде

$$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \approx \left(1 + \frac{2\pi}{3} \frac{\beta'^2(\gamma + 1)}{\beta^2 \varepsilon} \int_0^\infty g(R) R^3 dR \right) \left[1 + \frac{\beta'}{\beta} \int_0^\infty \frac{R^3 g(R) dR}{q(R, R_\omega)} \right]^{-2}, \quad (16)$$

где резонансный множитель имеет вид $q(R, R_\omega) = (1 - (R / R_\omega)^2 (1 + i / Q_\omega))$, $\gamma = 1.4$ – постоянная адиабаты, Q_ω – добротность монополярных колебаний пузырька, β и β' – адиабатическая сжимаемость воды ($\beta = 1 / \rho c^2$) и газа в пузырьках ($\beta' = \gamma / P_0$). В формуле (16) были использованы

ранее полученные аппроксимации для $g(R)$ вида [8]:

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp \left[-n \left(\frac{R_p}{R} + \frac{R}{R_m} \right) \right]. \quad (17)$$

Экспериментальные методы и аппаратура

Измерения нелинейного параметра по описанной выше методике по формуле (6) впервые в ТОИ ДВО РАН проводились в 12 и 16 экспедиционных рейсах НИС «Академик А. Виноградов» (1988, 1990) в диапазоне частот от 4 до 40 кГц на различных глубинах. Экспериментальная установка для измерений нелинейного параметра в различных акваториях рейса включала в себя выносную забортную часть с приемно-передающими антеннами и измерительную электронную часть, связанные друг с другом соединительными кабелями. Выносная забортная часть представляла собой платформу из пенопласта размерами $1 \cdot 1 \cdot 0,3$ м, к которому с помощью тонкого фала прикреплялась приемопередающая параметрическая антенна. Длина подвеса антенны могла изменяться. Излучение в рабочем положении происходило вверх, к поверхности. Приемная антенна регистрировала отраженный от водной поверхности сигнал. Плотик с антенной мог отпускаться от борта судна на вытяжном фале на расстояние до 150 м. Сигнал посылки и эхо-сигналы с приемной антенны передавались по отдельным кабелям к электронной измерительной части, находившейся на борту судна.

В дальнейшем для изучения распределения нелинейности на больших глубинах был создан нелинейный акустический зонд, основными элементами которого является параметрический излучатель и ячейка определенной длины, внутри которой распространяется бигармонический звуковой импульс [2], излученный параметрическим излучателем. Для изучения тонкой структуры приповерхностного слоя морской воды ручной зонд производит измерения в малом слое воды, ограниченном длиной ячейки, при этом в процессе погружения (или подъема) происходит послойное измерение нелинейного параметра, коэффициента объемного рассеяния и затухания звука. Таким образом,

исследователь получает тонкую структуру воды с высоким пространственным разрешением.

Суть измерений в зонде заключается в том, что излученный бигармонический импульс распространяется в пространстве, ограниченном с одной стороны отражающей пластиной, а с другой стороны самим излучателем. Импульс многократно отражается от пластины и излучателя, таким образом совершает большой пробег в малом объеме пространства, при этом происходит накопление нелинейных эффектов, в частности, рост нелинейно генерируемой волны разностной частоты. Селективный усилитель приемного тракта выделяет разностную частоту, оцифровывает и передает в процессор обработки. Измерение коэффициента затухания проводится по спаду амплитуды многократно отраженных импульсов частоты накачки.

На рис. 2 показана функциональная схема зонда и спектр частот на приемном гидрофоне при излучении параметрическим излучателем бигармонического сигнала $698 + 716$ кГц. Сам погружаемый зонд представляет собой штангу длиной 70 см, на одном конце которой закреплен параметрический излучатель, ось излучения которого направлена вдоль оси штанги в сторону отражающей пластины, закрепленной на противоположном конце. Параметрический излучатель изготовлен на основе керамики ЦТС-19 диаметром 66 мм с резонансной частотой 650 кГц, с шириной характеристики направленности 2 градуса. В тракте излучения использовался цифровой программируемый генератор сигналов произвольной формы ГСПФ-053, сигналы которого усиливались усилителем мощности У7-5 и дополнительно блоком излучения со встроенным коммутатором сигналов, который позволяет принимать отраженный от пластины импульс в паузах между посылками. Рабочий диапазон частот накачки находится в пределах 650–750 кГц. Тракт приема измерителя нелинейности построен на основе селективного усилителя SN-233, который позволяет качественно отделить акустические сигналы разностной частоты измерителя нелинейности от сигналов накачки, и имеет коэффициент усиления до 10^6 . Ввод данных в компьютер проводился с помощью 12-разрядной многоканальной платы АЦП L783, производства фирмы L-Card с максимальной частотой квантования 3 МГц.

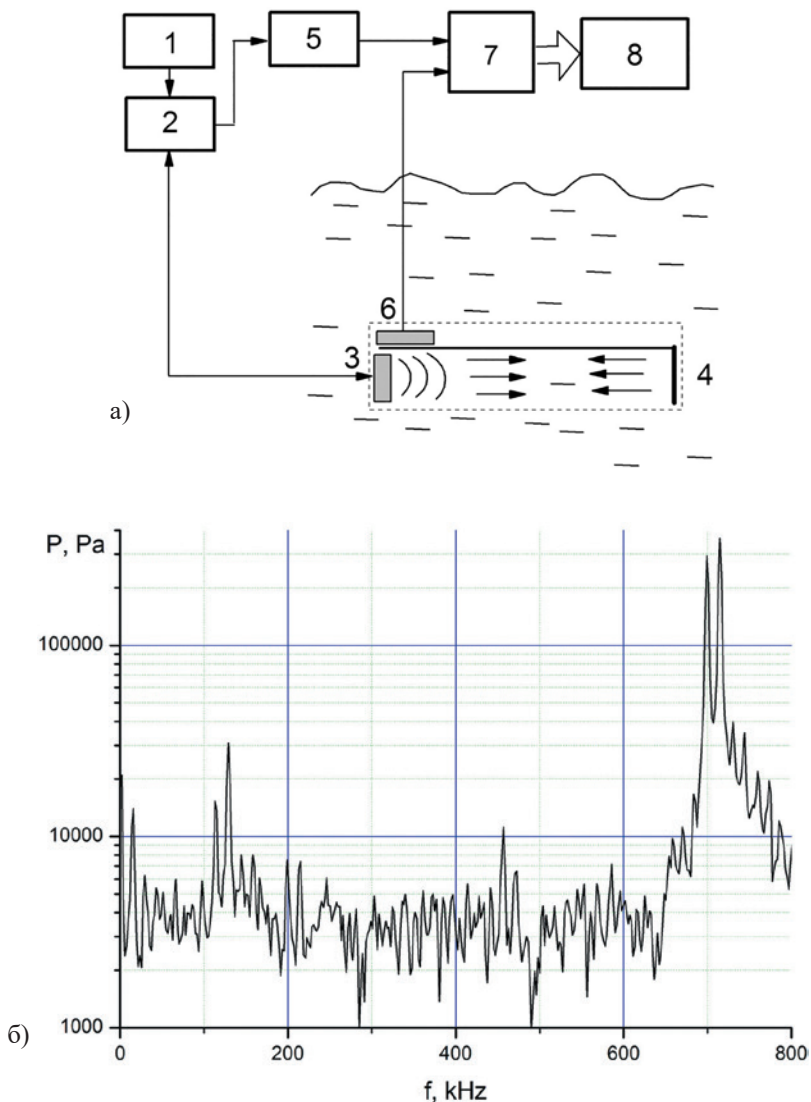


Рис. 2. Функциональная схема зонда для измерения нелинейного акустического параметра воды (а) и спектр частот на приемном гидрофоне (б) при излучении бигармонического сигнала 698 + 716 кГц: 1 – тракт формирования и излучения параметрических импульсов; 2 – коммутатор сигналов излучения-приема; 3 – параметрический излучатель; 4 – отражающая пластина; 5 – селективный усилитель сигналов разностной частоты; 6 – датчик глубины; 7 – двухканальный АЦП; 8 – компьютер

Результаты измерений нелинейного параметра в приповерхностном слое океана

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений нелинейного акустического параметра приповерхностного слоя вод северной части Тихого океана на различных частотах (усредненные данные), полученные в ряде экспедиций на НИС «Академик А. Виноградов».

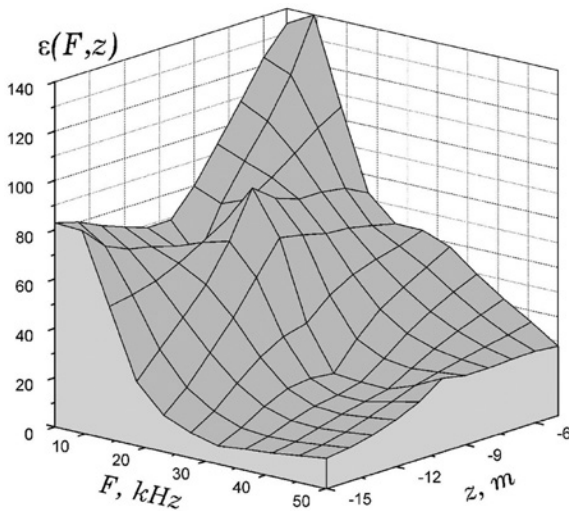


Рис. 3. Нелинейный параметр приповерхностного слоя субарктических вод северной части Тихого океана (усредненные данные)

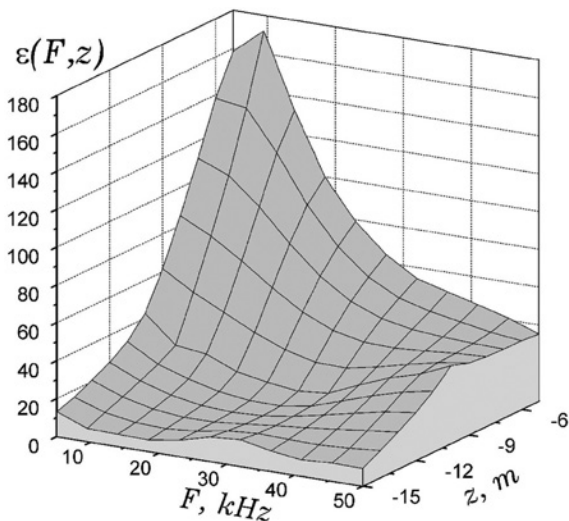


Рис. 4. Нелинейный параметр приповерхностного слоя субтропических вод северной части Тихого океана (усредненные данные)

Частотные зависимости нелинейного параметра морской воды, аппроксимирующие методом наименьших квадратов экспериментальные значения, можно записать в виде степенной зависимости $\varepsilon = A_\varepsilon F^n$. Частотная зависимость $\varepsilon(F)$ обусловлена наличием пузырьков в приповерхностном слое моря, нелинейные колебания которых обуславливают зависимость от частоты нелинейного параметра. Как правило, с уменьшением разностной частоты F величина нелинейного параметра $\varepsilon(F)$ возрастает. При этом значения ε могут достигать значений $\varepsilon > 100$, что в 20–30 раз превышает значения ε для чистой (без включений) морской воды.

Функция $\varepsilon(F)$ зависит от концентрации пузырьков в приповерхностном слое, величина которой в свою очередь изменяется в зависимости от глубины. Одновременно изменяется и величина нелинейного параметра. Из рис. 3 и 4 отчетливо виден приповерхностный слой с характерной толщиной $h \sim 5\text{--}10$ м в зависимости от частоты. Резюмируя рассмотренные выше результаты, можно предложить следующие эмпирические зависимости нелинейного параметра от частоты и от глубины

$$\varepsilon(F, z) = A_\varepsilon F^n \exp(-z/h). \quad (18)$$

Полученные значения величины отражают наши представления о влиянии приповерхностных слоев пузырьков на величину нелинейного параметра морской воды.

Измерения нелинейного параметра до глубины расположения термоклина океана

Нелинейный акустический зонд использовался в экспериментах по исследованию нелинейности морской воды в верхнем слое Индийского океана до глубины расположения термоклина во время кругосветной экспедиции на паруснике «Надежда» в 2003 г. [2].

На рис. 5 кривой 3 представлено относительное изменение нелинейного акустического параметра морской воды $\varepsilon_{\text{exp}}(z)$ от глубины, кривой 1 показано относительное изменение температуры с глубиной. Значение нелинейного параметра на поверхности моря $\varepsilon_0 = 6.08$,

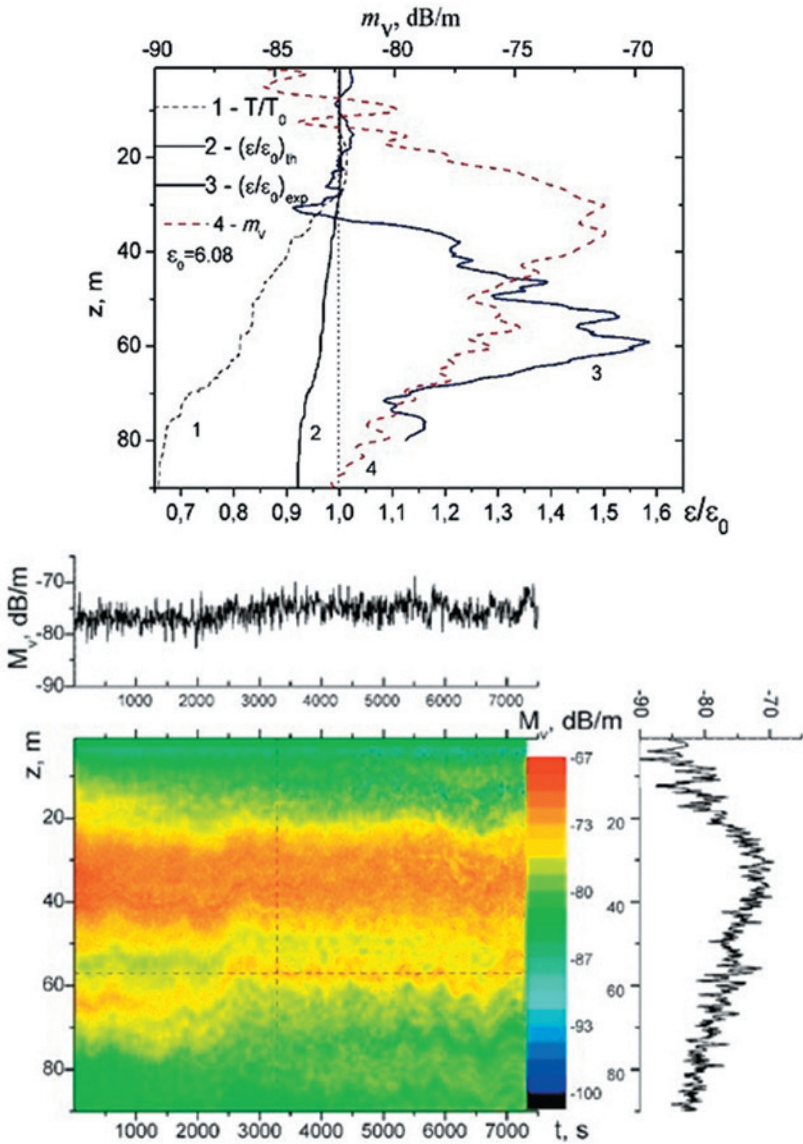


Рис. 5. Зависимости нелинейного параметра $\epsilon_{\text{exp}}(z)$ от глубины z , существенно превышающие расчетные зависимости $\epsilon_{th}(z)$ для чистой воды и свидетельствующие о наличии дополнительного вклада, связанного с наличием микронеоднородностей в море и регистрируемых с помощью коэффициента рассеяния звука M_V : 1 – температура $T(z)/T_0(z=0)$; 2 – $\epsilon_{th}(z)$; 3 – $\epsilon_{\text{exp}}(z)$ на частоте 15 кГц (накачка 700 кГц); 4 – $M_V(z)$ на частоте 100 кГц

видно, что нелинейный параметр существенно изменяется с глубиной. В качестве оценки кривой 2 представлено распределение расчетного параметра $(\varepsilon / \varepsilon_0)_{th}$, которое получено на основе данных Вильсона и Дель-Гроссо [10, 11] для скорости звука $c(T, S, P)$, как функции температуры T , давления P и солёности S в соответствии с формулами:

$$\varepsilon(T, S, P) = 1 + \rho c(T, S, P) \left[\frac{dc(T, S, P)}{dp} + \frac{\alpha T}{\rho C_p} \frac{dc(T, S, P)}{dT} \right], \quad (19)$$

$$dc / dT = 4.587 - 0.107T + 7.81 \cdot 10^{-4} T^2 + 2.71 \cdot 10^{-5} TP - 7.19 \cdot 10^{-7} P^2 - 1.2 \cdot 10^{-2} (S - 35), \quad (20)$$

$$dc / dP = 0.15848 + 3.144 \cdot 10^{-5} P - 1.384 \cdot 10^{-11} P^3 + 1.354 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.438 \cdot 10^{-6} TP, \quad (21)$$

где ρ – плотность, C_p – теплоемкость, α – коэффициент теплового расширения.

Из сопоставления расчетных и экспериментальных результатов для $(\varepsilon / \varepsilon_0)_{th}$ и $(\varepsilon / \varepsilon_0)_{exp}$ (кривые 2 и 3) видно, что эти результаты существенно расходятся, что свидетельствует в пользу того, что нелинейность в морской воде в основном связана с наличием в ней микронеоднородностей различного происхождения. Кривой 4 на рис. 5 справа представлены измерения коэффициента рассеяния звука m_v на частоте 100 кГц. Сопоставление полученных результатов показывает, что изменение параметра нелинейности расходится с максимальными абсолютными значениями коэффициентов рассеяния звука m_v и значительное изменение наблюдается несколько ниже горизонта максимума m_v и совпадает с положением внутренней волны, которая обычно присутствует на границах звукорассеивающих слоев, в местах больших градиентов коэффициента рассеяния звука.

Необходимо подчеркнуть одно важное обстоятельство – измерения нелинейного параметра были проведены не на второй гармонике от частоты накачки около 1.4 МГц, а на небольшой разностной частоте 15 кГц. Способ регистрации нелинейности именно при преобразовании накачки в волну разностной частоты, как оказывается, очень чувствителен к наличию микронеоднородностей в морской воде. Таким образом, применение этого нелинейного способа с преобразованием в волну разностной частоты позволяет получить новые данные о структуре микронеоднородностей морской среды.

Измерения нелинейного параметра на шельфе Японского моря

На морском шельфе большое значение имеет поведение характеристик в приповерхностном слое, который характеризуется большой изменчивостью. Измерения нелинейности проводились с помощью нелинейного акустического зонда в бухте Витязь с борта катера, находящегося в дрейфе. Измеритель опускался вручную с борта, одновременно с этим проводилась запись сигнала разностной частоты и глубины погружения. Излучался сигнал с частотами 698 и 718 кГц с периодичностью 40 мс. Многократно отраженный сигнал записывался в компьютер через плату АЦП. Определение нелинейного акустического параметра проводилось с помощью формулы (6).

На рис. 6 показаны зависимости параметра нелинейности от глубины на акватории б. Витязь при опускании измерителя от поверхности до глубины 21 м, при волнении моря 3 балла. Результаты свидетельствуют о наличии ярко выраженного приповерхностного слоя толщиной до 5–10 м с повышенной нелинейностью, который наблюдается даже в сравнительно спокойной воде без обрушения волн и образования пузырьковых облаков.

Наиболее впечатляющими результатами по акустическим свойствам приповерхностного слоя моря являются результаты, полученные в периоды сильного ветра над морем. Эффекты обрушения ветровых волн производят многочисленные пузырьковые облака, которые наряду с нелинейными свойствами являются эффективными поглотителями энергии звуковых волн, распространяющихся в море [7, 9, 11]. Коэффициент поглощения звука α , обусловленный пузырьками, можно рассчитать по приближенной формуле [7, 8]:

$$\alpha \approx \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \left[1 + \frac{4\pi}{3} \frac{\rho c^2}{\gamma P_0} \int_0^\infty \frac{g(R) dR}{q(R, R_0)} \right]^{1/2}. \quad (22)$$

Как видно из формул (16) и (22) для определения акустических характеристик верхнего слоя морской воды важен вид функции $g(R)$ в возможно более широкой области изменения R . Данные по рассеянию звука на различных частотах в приповерхностном слое моря

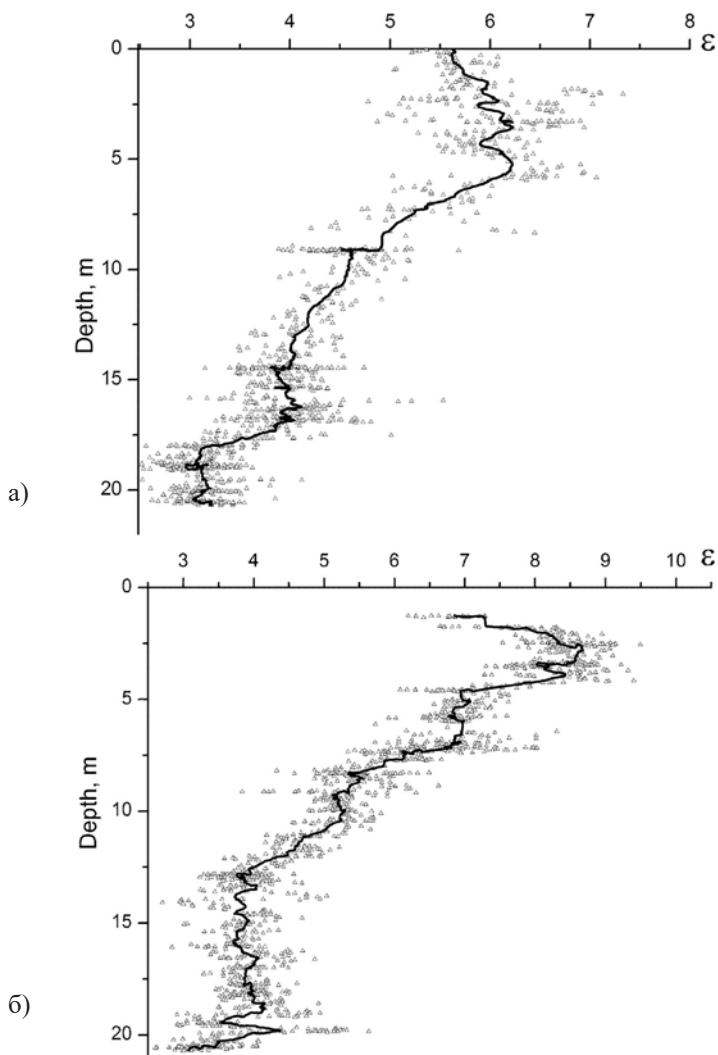


Рис. 6. Зависимости параметра нелинейности от глубины на акватории б. Витязь при различном зондировании: а) – от поверхности до глубины 21 м; б) – от глубины 21 м вверх

позволили выявить структуру распределения по размерам пузырьков – функцию $g(R)$, которая в общем виде представлена формулой (17). Полученные с помощью рассеяния звука данные по концентрации пузырьков в приповерхностных слоях морской воды позволяют

определить дополнительную акустическую нелинейность, а также дополнительное затухание звука, привносимые распределенными в воде пузырьками. На рис. 7 представлены изменения во времени концентрации пузырьков, коэффициента поглощения звука на частоте 138 кГц и параметра акустической нелинейности морской воды в приповерхностном слое пузырьков. Видно, что перечисленные акустические параметры изменяются в широких пределах при обрушениях поверхностных волн и сильном ветре, приводящим к модуляциям акустических свойств в приповерхностном слое моря.

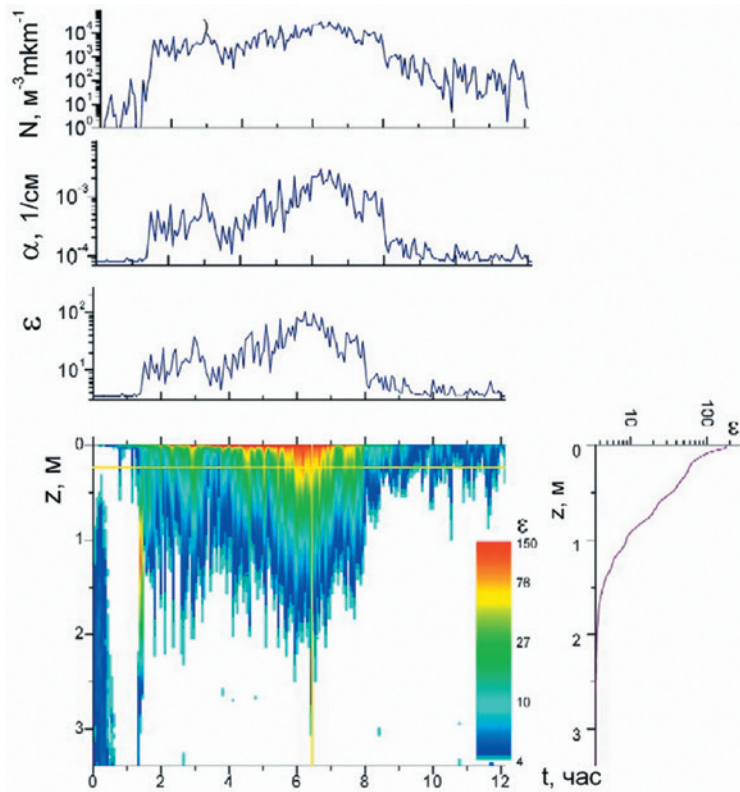


Рис. 7. Изменение во времени в приповерхностном слое моря при резком изменении силы ветра и проявление взаимосвязи акустической нелинейности ϵ , поглощения звука α и распределения пузырьков в приповерхностном слое моря (в $\text{м}^3 \text{мкм}^{-1}$) на глубине z , отмеченной горизонтальной линией на нижнем рисунке

Заключение

Представлено описание экспериментальных методов изучения акустической нелинейности морской воды на различных глубинах *in situ*. Методы измерений основаны на использовании параметрической генерации звука на различных разностных частотах при бигармоническом излучении высокочастотной накачки. Представлены результаты измерений нелинейного акустического параметра воды в верхнем слое океана при различных гидро- и метеоусловиях. Измерения нелинейного акустического параметра проводились в различные годы в приповерхностном слое в северо-западной части Тихого океана, в верхнем слое до глубины 100 м в Индийском океане, а также на шельфе Японского моря, в бухте Витязь залива Петра Великого. Проанализированы теоретические зависимости нелинейного параметра воды с различными включениями и получены практически применяемые формулы для акустической диагностики по нелинейному параметру их содержания в морской воде. Показано, что параметр акустической нелинейности существенно изменяется с глубиной и имеет различные соотношения в различных районах океана. Показана возможность прогнозирования распределения акустической нелинейности и поглощения звука в океане на основе данных по рассеянию звука.

Благодарность. Работа выполнена по госзаданию № 0271-2019-0009 и частично поддержана грантами РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний Восток» № 18-И-004.

Литература

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана: Л.: Гидрометеиздат. 1982. 264 с.
2. Буланов В.А., Корсков И.В., Попов П.Н. Измерения нелинейного акустического параметра морской воды // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 3. С. 114–118.
3. Есипов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н. Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 102–108.
4. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии: М.: Физматлит. 2010. 264 с.
5. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука. 1990. 237 с.

6. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение. 1981. 264 с.
7. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 130. No 5. P. 3438–3449.
8. Akulichev V.A., Bulanov V.A. The bubble distribution and acoustic characteristics of the subsurface sea layer // Proc. Mtgs. Acoust. 2015. Vol. 24. 045003. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000163>.
9. Farmer D., Vagle S. Wave induced bubble clouds in the upper ocean // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp.
10. Fofonoff N.P., Millard R.C. Jr. Algorithm for computation of fundamental properties of seawater // UNESCO Technical papers in Marine Science. 1983. No. 44. 53 p. https://www.researchgate.net/publication/33549403_Algorithms_for_Computation_of_Fundamental_Properties_of_Seawater
11. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30. No 9. P. 2163–2171.
12. Grelowska G., Kozaczka E. Nonlinear Properties of the Gotland Deep – Baltic Sea // Archives of Acoustics. 2015. Vol. 40. No 4. P. 595–600.

References

1. Brekhovskih L.M., Lysanov YU.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana: L.: Gidrometeoizdat. 1982. 264 p.
2. Bulanov V.A., Korskov I.V., Popov P.N. Izmereniya nelinejnogo akusticheskogo parametra morskoy vody // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2017. № 3. P. 114–118
3. Esipov I.B., Rybak S.A., Serebryanyj A.N. Nelinejnaya akusticheskaya diagnostika zemnyh porod i okeana // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2006. T. 176. № 1. P. 102–108
4. Kuznecov V.P. Nelinejnaya akustika v okeanologii: M.: Fizmatlit. 2010. 264 p.
5. Naugol'nyh K.A., Ostrovskij L.A. Nelinejnye volnovye processy v akustike. M.: Nauka. 1990. 237 p.
6. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. Nelinejnaya gidroakustika. L.: Sudostroenie. 1981. 264 p.
7. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 130. No 5. P. 3438–3449.
8. Akulichev V.A., Bulanov V.A. The bubble distribution and acoustic characteristics of the subsurface sea layer // Proc. Mtgs. Acoust. 2015. Vol. 24. 045003. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000163>.
9. Farmer D., Vagle S. Wave induced bubble clouds in the upper ocean // J. of Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp.
10. Fofonoff N.P., Millard R.C. Jr. Algorithm for computation of fundamental properties of seawater // UNESCO Technical papers in Marine Science. 1983. No. 44. 53 p.

https://www.researchgate.net/publication/33549403_Algorithms_for_Computation_of_Fundamental_Properties_of_Seawater.

11. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // *Journal of Physical Oceanjraphy*. 2000. Vol. 30. No 9. P. 2163–2171.
12. Grelowska G., Kozaczka E. Nonlinear Properties of the Gotland Deep – Baltic Sea // *Archives of Acoustics*. 2015. Vol. 40. No 4. P. 595–600.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА КЛИНОВИДНОМ ШЕЛЬФЕ

**Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А.,
Швец В.А., Яковенко С.В.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток*

E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Аннотация

При исследовании различных гидрофизических и гидроакустических волновых процессов крайне важно знать закономерности их распространения в море убывающей глубины, особенно в шельфовых областях, а также закономерности их трансформации в сейсмоакустические процессы земной коры. В ходе обработки и анализа экспериментальных данных комплексного эксперимента в данной статье исследуются эти закономерности. В эксперименте использовались низкочастотный гидроакустический излучатель, генерирующий гармонические колебания на частоте 22 Гц, приемные гидроакустические системы и береговой лазерный деформограф. Установлено, что гидроакустические волны, распространяющиеся по шельфу убывающей глубины, трансформируются в сейсмоакустические волны при глубинах моря, равных или меньше половины гидроакустической длины волны. Сравнение результатов данной статьи с ранее полученными результатами позволило утверждать, что такие закономерности должны быть присущи всем гидрофизическим и гидроакустическим процессам.

Ключевые слова: гидроакустические волны, гидроакустический излучатель, лазерный деформограф, модель, трансформация, сейсмоакустические волны.

PECULIARITIES OF HYDROACOUSTIC WAVE PROPAGATION ON A WEDGED SHELF

**Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.A.,
Shvets V.A., Yakovenko S.V.**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences*

E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Abstract

When studying the various hydrophysical and hydroacoustic wave processes, it is extremely important to know the regularities of their propagation in the sea of decreasing depth, especially in the shelf areas, as well as the regularities of their transformation into seismoacoustic processes of the earth's crust. In the course of processing and analyzing the experimental data of the complex experiment, these regularities are investigated in this article. The experiment used a low-frequency hydroacoustic emitter generating harmonic oscillations at a frequency of 22 Hz, receiving hydroacoustic systems and a coastal laser strainmeter. It has been established that hydroacoustic waves propagating along a shelf of decreasing depth are transformed into seismoacoustic waves at sea depths equal to less than half of the hydroacoustic wavelength. Comparison of the results of this article with previously obtained results made it possible to assert that such regularities should be inherent in all hydrophysical and hydroacoustic processes.

Keywords: Hydroacoustic waves, hydroacoustic emitter, laser strainmeter, model, transformation, seismoacoustic waves.

ORCID Dolgikh G.I.: 0000-0002-2806-3834

Введение

При решении различных прикладных задач, связанных с изучением естественных и искусственных процессов и явлений, происходящих в Мировом океане, широко используются гидроакустические методы, ориентированные не только на изучение основных характеристик исследуемых объектов, но также на их идентификацию и пеленгацию. Одной из таких задач является бесконтактное дистанционное изучение структуры и состава морской земной коры, особенно для покрытых мощным льдом акваторий, основанное на использовании низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых приемных систем сейсмоакустических сигналов [1, 2]. Применение береговых приемных систем сейсмоакустических сигналов, образованных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода – дно», позволяет исследовать структуру и строение морской земной коры без масштабного разрушения ледяного покрова, что делает применение данных методов более экономичным по сравнению с традиционными методами. При разработке и применении данных методов важно выявить закономерности распространения

низкочастотных гидроакустических сигналов на шельфе убывающей глубины и их трансформации в сейсмоакустические сигналы, распространяющиеся далее в земной коре. Знание этих закономерностей очень актуально при исследовании сигналов, генерируемых естественными и искусственными морскими объектами, особенно в низкочастотном звуковом и инфразвуковом диапазонах, и распространяющихся из «глубокого» в «мелкое» море. Эти же знания необходимы при изучении коммуникационных сигналов морских животных, особенностей их общения в шельфовых областях. На основе полученных знаний в дальнейшем возможно решение обратной задачи: разработка и создание излучающих систем в конкретных частотных диапазонах, ориентированных на придонное распространение генерируемых ими сигналов, что крайне важно при налаживании сверхдальней связи с донными обсерваториями и комплексами по разработке и добыче полезных ископаемых. Первые проведенные подобные работы с низкочастотным гидроакустическим излучателем, генерирующим сигналы на частоте 33 Гц, позволили установить некоторые закономерности для данного частотного диапазона [3]. Но остается открытым вопрос: как трансформируются выявленные в работе [3] закономерности при понижении частоты излучаемого сигнала? В данной статье изучаются некоторые особенности распространения и трансформации гидроакустических сигналов на частоте 22 на шельфе убывающей глубины.

Описание эксперимента

Эксперимент проводился в бухте Витязь Японского моря. Карта-схема эксперимента приведена на рис. 1. В точке «Метка без названия» (координаты N42°35.6827', E131°09.8707') при глубине моря 32 м на якоре стояло научно-исследовательское судно, с борта которого на глубину 18 м был опущен низкочастотный гидроакустический излучатель электромагнитного типа [4], создающий в воде гармонические сигналы на частоте 22 Гц.

Излучатель входит в состав излучающей гидроакустической системы, состоящей из излучателя с электромагнитным преобразователем, рамы для подвеса излучателя, кабель-шланга с контрольным манометром, источника электропитания, электронасоса, контрольного

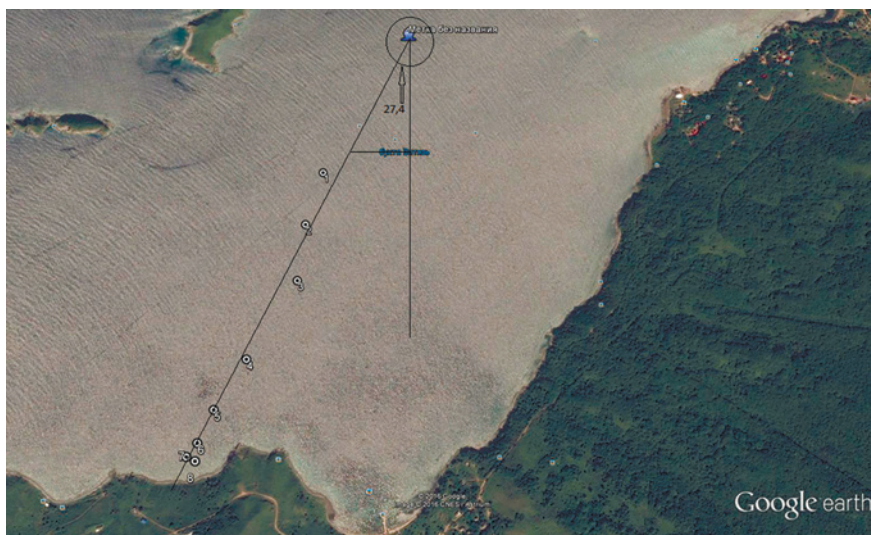


Рис. 1. Карта-схема эксперимента. Метка без названия – расположение судна с излучателем. 1–8 – номера станций приема. 27.4° – угол между трассой приема и направлением «север-юг»

гидрофона, двух калибровочных акселерометров. Излучающая гидроакустическая система предназначена для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц в диапазоне 19–26 Гц. Амплитуда объемных колебательных смещений излучателя достигает величины $0,0123 \text{ м}^3$. На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт. Внешний вид излучающей гидроакустической системы приведен на рис. 2.

Излучатель имеет массу 260 кг в воздухе и 40 кг в воде. Содержит цилиндрический корпус 1 и пару излучающих поршней 2, колеблющихся во взаимно-противоположных направлениях и создающих синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждает преобразователь электромагнитного типа с П-образными наборными половинами сердечника 3 и четырьмя катушками 4. Между краями поршней зажат набор из 312 цилиндрических пружин 5, предварительное сжатие которых достигается за счет пониженного на 0,5 атм. давления воздуха в полости излучателя относительно гидростатического на глубине его погружения. Для компенсации

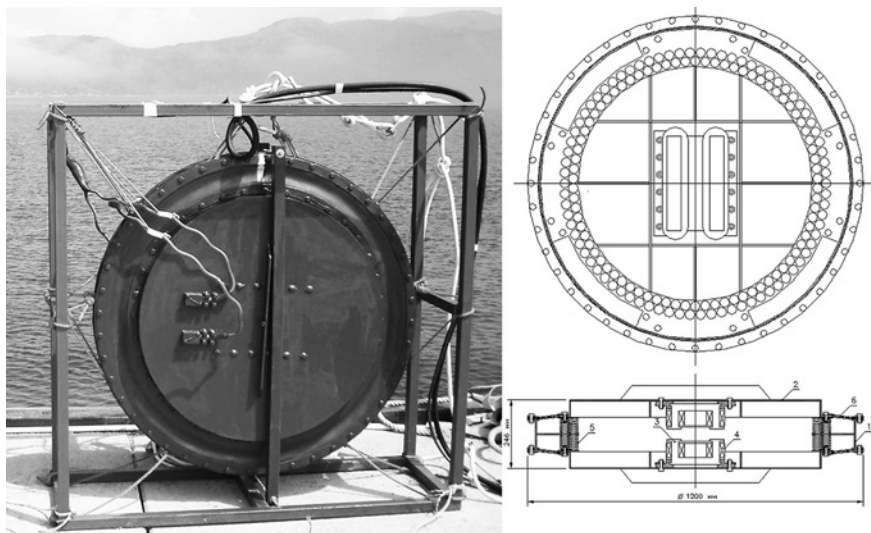


Рис. 2. Гидроакустический излучатель 19–26 Гц

гидростатического давления при погружении или поднятии применяется шланг длиной 60 м с контрольным манометром и двумя ниппелями. Зазоры между фланцами корпуса и краями поршней уплотнены резинотканевыми воротниками 6. Катушки в каждой паре на половине сердечника 3 соединены последовательно. Подвод тока к ним осуществляют посредством упругих проводников, выведенных через уплотнения на поршнях 2. Коммутация проводников выполнена непосредственно на излучателе клеммно-болтовыми соединениями с полиизобутиленовой гидроизоляцией и соответствует последовательному соединению пар. В качестве первичных источников постоянного тока используется батарея последовательно соединенных (в количестве от 3 до 22 штук, в зависимости от необходимой мощности) кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А*час. Источник питания представляет собой мостовой ключевой усилитель, выполненный на двух полумостовых IGBT-модулях, снабжен компенсирующей батареей конденсаторов 420 мкФ, защитным автоматом и амперметром постоянного тока. При работе на станциях 3–7 низкочастотный гидроакустический излучатель создавал давление около 7 кПа, который регистрировался контрольным гидрофоном. А при работе на станциях 1–2 – около 5,8 кПа. Излученный

гидроакустический сигнал регистрировался гидрофоном 8104 компании Bruel & Kjaer на разных глубинах в точках полигона № 1–8 (см. рис. 1), который опускался с борта катера. Гидрофон Bruel & Kjaer 8104 был помещен на мобильной капсуле, внутри которой находились: предусилитель гидрофона, аналого-цифровой преобразователь, автономное записывающее устройство. В каждой точке приема от поверхности до дна проводилась регистрация на горизонтах через 1 м. Гидрофон Bruel & Kjaer 8103 применялся для вертикального зондирования гидроакустического поля вблизи излучателя, по которым в дальнейшем определялась плотность энергии, которая создавалась в воде излучателем.

На берегу трансформированные сейсмоакустические сигналы принимались береговым 52,5-метровым лазерным деформографом, который находился на м. Шульца в точке с координатами N42°35.5817', E131°09.9667'. Кратко работа лазерного деформографа описана в [3]. Ближайшая к воде часть конструкции 52,5-метрового лазерного деформографа (углоковый отражатель) находится на расстоянии 120 м от уреза воды и на высоте 67 м над уровнем моря. Рабочее плечо 52,5-метрового лазерного деформографа ориентировано относительно линии «север-юг» под углом 18° (198°). Вся информация с системы регистрации лазерного деформографа по кабельным линиям поступает в лабораторный корпус, где заносится в специально созданную базу данных. В дальнейшем полученные экспериментальные данные проходят предварительную и окончательную обработку, зависящую от поставленных задач. Применяемые методы интерферометрии в лазерном деформографе позволяют измерять изменение интенсивности интерференционной картины с высокой точностью. Теоретически с применением интерференционных методов можно измерять смещение между плитами деформографа с точностью $10^{-6} \times \frac{\lambda_l}{2}$, где λ_l – длина волны применяемого частотно стабилизированного лазера. В нашем случае точность измерения смещения между плитами равна 0,01 нм. В 52,5-метровом лазерном деформографе используется частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер, обеспечивающий долговременную стабильность частоты в одиннадцатом знаке. При точности

измерения смещения 0.01 нм чувствительность 52,5-метрового лазерного деформографа равна $\frac{\Delta L}{L} = \frac{0.01 \text{ нм}}{52.5 \text{ м}} = 0.19 \times 10^{-12}$. Амплитудно-частотная характеристика 52,5-метрового лазерного деформографа имеет линейный вид в инфразвуковом диапазоне, а в звуковом диапазоне – квадрат синуса с удвоенной амплитудой [5]. При регистрации сейсмоакустической волны продольного типа, распространяющейся вдоль оси лазерного деформографа со скоростью 2300 м/с, взятой в соответствии с [3], он регистрирует амплитуды волн на частотах 22 и 33 Гц, равных $2A_0$ и $0,98A_0$, соответственно, где A_0 – амплитуда сейсмоакустической волны. Это необходимо учитывать при дальнейших расчетах, которые проводятся с использованием данных лазерного деформографа.

Полученные экспериментальные данные после предварительной обработки помещались в базу экспериментальных данных и впоследствии обрабатывались.

Обработка экспериментальных данных

Каждая установка, применяемая в эксперименте, привязывалась к часам точного времени, обеспечивающим точность в 1 мс. В ходе предварительной обработки проводилась спектральная обработка полученных синхронных данных гидрофона и лазерного деформографа. При этом было установлено, что в данных обеих приемных систем присутствуют колебания на частоте 22 Гц при работе на станциях 1–7 и отсутствуют эти же колебания при работе на станции 8. В последствии выяснилось, что в момент работы на станции 8 излучатель не работал. В качестве примера уверенного приема излученного излучателем сигнала гидрофоном и лазерным деформографом на рис. 3 приведены участки спектров одновременных записей гидрофона и лазерного деформографа при работе на станции 3, на которых выделены мощные спектральные составляющие на частоте 22 Гц.

При проведении измерений на каждой станции излучатель работал около 15 мин в непрерывном режиме излучения гармонического сигнала на частоте 22 Гц. Измерения гидрофоном проводились от дна до поверхности через 1 м. На каждом горизонте гидрофон записывал

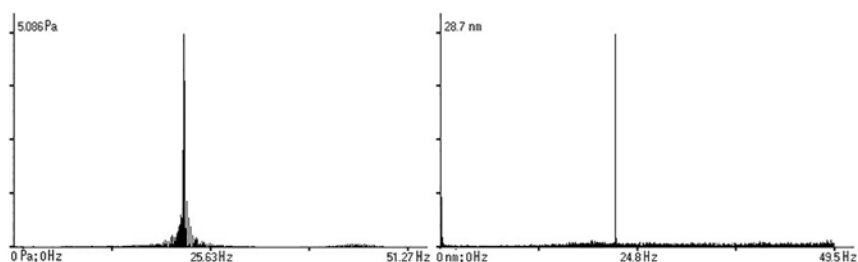


Рис. 3. Участки спектров синхронных данных гидрофона (слева) и лазерного деформографа (справа)

сигнал в течение 1 мин. По полученным данным гидрофона определялась амплитуда принятого сигнала на частоте 22 Гц. По этим данным в дальнейшем строилась кривая, описывающая уровень принятого гидроакустического сигнала, начиная от поверхности до дна. Для наглядности на рис. 4 – рис. 7 приведены кривые полученных экспериментальных данных (там же приведены модельные кривые, о которых будет сказано в разделе «Модельные расчеты»). Затем для каждой кривой строилось полиномиальное уравнение наиболее подходящей степени. Экспериментальные данные лазерного деформографа записывались на рабочий компьютер с частотой дискретизации 1000 Гц. При работе на каждой станции излучения запись лазерного деформографа разбивалась на последовательные участки по 65 536 точек, которые в дальнейшем подвергались спектральной обработке. При такой обработке были выделены 12–13 участков записей лазерного деформографа при работе на каждой станции излучения и в соответствии с этим получены по 12–13 амплитуд сигнала на частоте 22 Гц, по которым в дальнейшем была определена средняя амплитуда. Полученные результаты, описанные в этом абзаце, приведены в таблице 1.

В дальнейших расчетах будем использовать следующие данные: $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ (плотность воды), $c_w = 1500 \text{ м/с}$ (скорость звука в воде), $\rho_b = 2100 \text{ м/с}$ (плотность пород верхнего слоя земной коры), $c_b = 2300 \text{ м/с}$ (скорость волны рэлеевского типа на границе «земная кора – воздух» [3]), $f = 22 \text{ Гц}$ (частота), $\theta = 9,4^\circ$ (угол между осью лазерного деформографа и линией «излучатель – станции 1–7»), $\omega = 2\pi f$, $R = 1780 \text{ м}$ (расстояние от точки излучения до ближайшей точки лазерного деформографа).

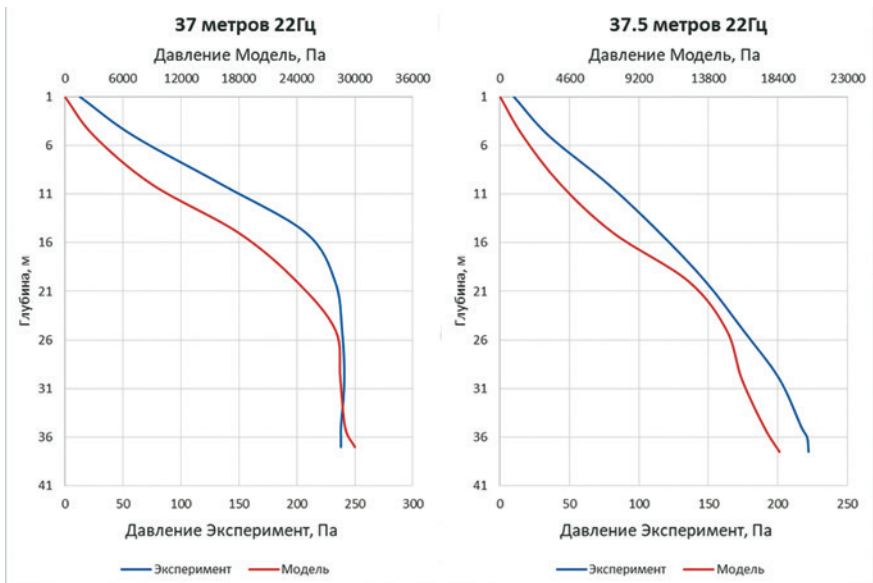


Рис. 4. Вертикальный профиль распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц на станциях 1 (слева) и 2 (справа)

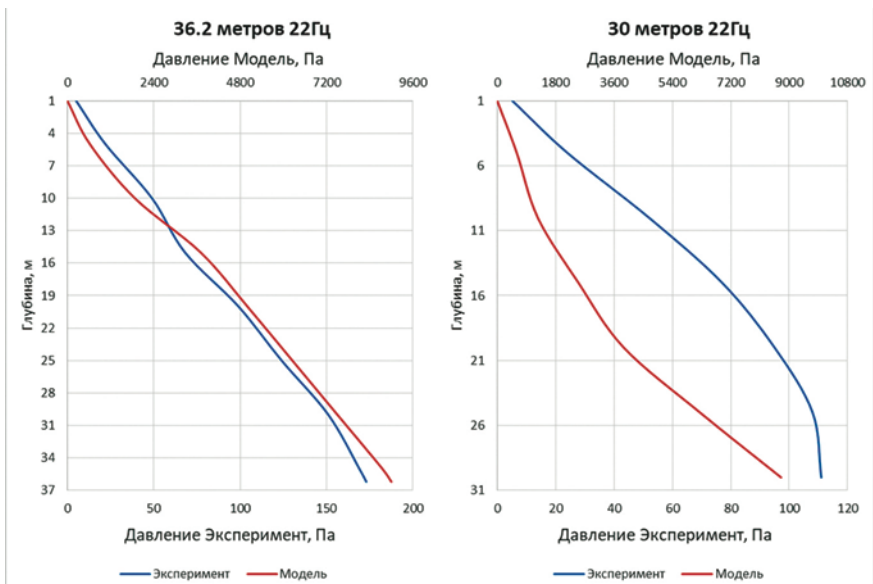


Рис. 5. Вертикальный профиль распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц на станциях 3 (слева) и 4 (справа)

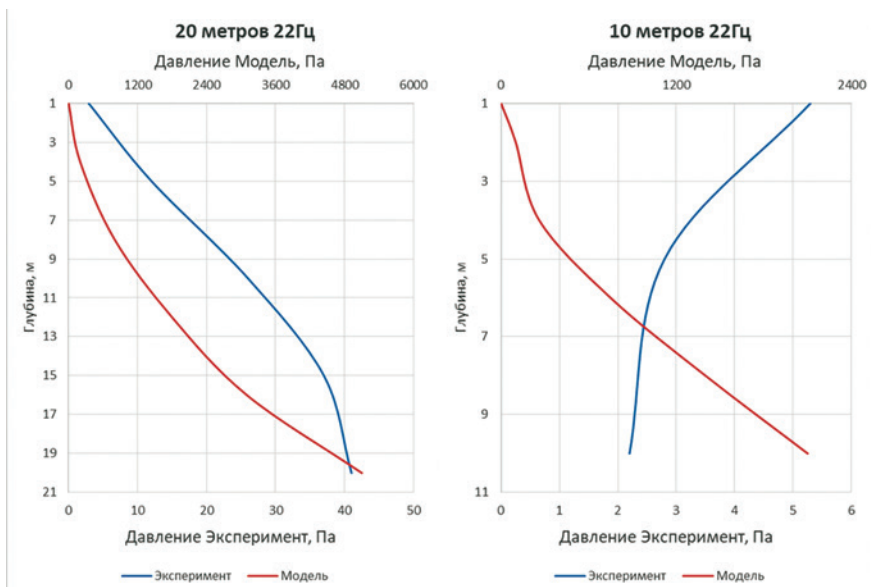


Рис. 6. Вертикальный профиль распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц на станции 5 (слева) и 6 (справа)

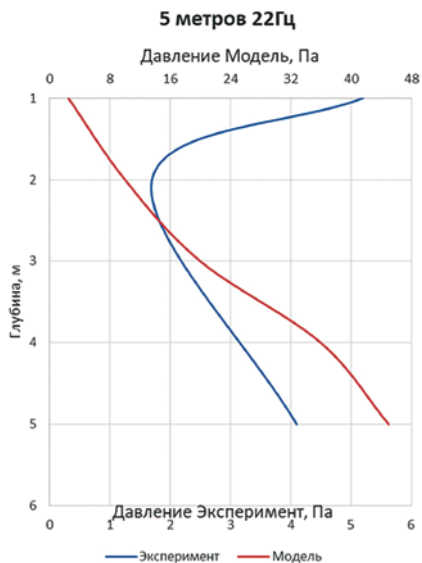


Рис. 7. Вертикальный профиль распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц на станц. 7

Таблица 1. Экспериментальные данные

№	Глубина места, м	Расстояние от точки излучения, м	Уравнение кривой	Амплитуда смещения, нм
1	37	335	$S_{37}(z) = (3.2835124 \times 10^{-7}) \times z^7 - (4.5340116 \times 10^{-5}) \times z^6 + 0.0024484 \times z^5 - 0.0643262 \times z^4 + 0.8225148 \times z^3 - 4.5942522 \times z^2 + 21.798353 \times z - 4.9269574$	14.6
2	37.5	502	$S_{37.5}(z) = (8.8507925 \times 10^{-5}) \times z^4 - 0.0085366 \times z^3 + 0.1861208 \times z^2 + 6.2774712 \times z + 2.4975244$	16.4
3	36.2	674	$S_{36.2}(z) = -(1.1161644 \times 10^{-4}) \times z^4 + 0.0063251 \times z^3 - 0.0895405 \times z^2 + 5.0292998 \times z - 0.206082$	28.7
4	30	970	$S_{30}(z) = (1.2446708 \times 10^{-4}) \times z^4 - 0.0112489 \times z^3 + 0.2185657 \times z^2 + 3.8794756 \times z + 0.9499853$	26.7
5	20	1148	$S_{20}(x) = (1.641604 \times 10^{-4}) \times z^4 - 0.0135414 \times z^3 + 0.2436404 \times z^2 + 1.2073308 \times z + 1.462406$	28.1
6	10	1252	$S_{10}(z) = 0.0561111 \times z^2 - 0.9616667 \times z + 6.2055556$	24.4
7	5	1300	$S_5(z) = 1.075 \times z^2 - 6.725 \times z + 10.85$	23.3

Рассчитаем плотность энергии гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу, по уравнениям, приведенным в таблице 1, для всех станций приема по формуле:

$$E_r = \int_0^h \frac{(S_h(z))^2}{2\rho_w c_w^2} dz, \quad (1)$$

где: $S_h(z)$ – уравнение кривой при глубине моря h .

В соответствии с [3, 6] предполагаем, что излученный низкочастотным гидроакустическим излучателем сигнал доходит до лазерного деформографа в виде волн поверхностного типа. При этом основной

вклад в смещения земной коры вносят затухающие поверхностные волны рэлеевского типа. Амплитуда данных волн экспоненциально затухает с глубиной земной коры. Поэтому плотность упругой энергии поверхностных волн рэлеевского типа можно подсчитать по следующему уравнению:

$$E_r = \int_0^{\lambda_b} \frac{\rho_b \omega^2 u^2 \exp(-4\pi z / \lambda_b)}{2 \cos(\theta)^2} dz, \quad (2)$$

где: u – амплитуда смещения на частоте излученного сигнала, равная половине амплитуды волны на частоте 22 Гц, выделенной из записи лазерного деформографа, λ_b – длина волны рэлеевского типа на границе «воздух – земная кора», равная 104,5 м. Результаты расчета приведены в таблице 2. В таблице 2 также приведены расчетные данные доли плотности гидроакустической энергии на каждой станции приема от плотности энергии излучателя с учетом цилиндрической расходимости излученного сигнала, а также доли плотности гидроакустической энергии, перешедшей на каждой станции приема в плотность сейсмоакустической энергии с учетом цилиндрической расходимости волны рэлеевского типа.

Таблица 2. Результаты расчета

Расстояние от точки излучения, м	Глубина места, м	Плотность энергии излучателя, Дж/м ³	Плотность гидроакустической энергии, Дж/м ³	Излучатель/гидроакустика, %	Плотность сейсмоакустической энергии, Дж/м ³	Сейсмоакустика/гидроакустика, %
335	37	0,124	$3,1 \times 10^{-4}$	83,8	$0,91 \times 10^{-8}$	4,2
502	37,5	0,124	$1,7 \times 10^{-4}$	68,8	$1,15 \times 10^{-8}$	8,8
674	36,2	0,176	$8,3 \times 10^{-5}$	31,8	$3,51 \times 10^{-8}$	46,8
970	30	0,176	$4,0 \times 10^{-5}$	22,1	$3,04 \times 10^{-8}$	61,5
1148	20	0,176	$3,3 \times 10^{-6}$	2,2	$3,37 \times 10^{-8}$	100
1252	10	0,176	$1,9 \times 10^{-8}$	1,4	$2,54 \times 10^{-8}$	100
1300	5	0,176	$4,3 \times 10^{-9}$	0,3	$2,32 \times 10^{-8}$	100

Модельные расчеты

С целью изучения пространственного распределения гидроакустической энергии были проведены модельные расчеты. Инструментом моделирования является метод спектральных элементов (SEM), который представляет собой метод конечных элементов высокого порядка, разработанный для местных и глобальных масштабов распространения сейсмических волн [7]. Мы моделировали распространение акустического сигнала на шельфе убывающей глубины с помощью программного пакета SEM с открытым исходным кодом SPECFEM2D [8, 9].

SPECFEM2D интегрирует упрощенную форму волнового уравнения (3–5) с помощью интерполяционного многочлена Лагранжа высокой степени. В пространственно-неоднородной области жидкости волновое уравнение для давления $P(x, t)$ имеет вид

$$\frac{1}{k} \ddot{P} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right), \quad (3)$$

где: $k(x)$ – адиабатический объемный модуль упругости жидкости.

В линейно-упругих телах тензор деформации $\varepsilon(x, t)$ вычисляется по вектору смещения u как

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right). \quad (4)$$

Тензор напряжений может быть выражен через тензор деформаций $\vec{\sigma}(\vec{x}, t)$ по закону Гука

$$\vec{\sigma} = \vec{c} : \varepsilon, \quad (5)$$

где двоеточие обозначает операцию сокращения двойного тензора. Упругие свойства среды описываются тензором упругости четвертого порядка.

SPECFEM2D позволяет пользователям выполнять 2D и 2.5D (осесимметричное) моделирование распространения акустических, упругих, вязкоупругих и пороупругих акустических волн. Кроме того, SEM сочетает гибкость метода конечных элементов с точностью спектрального метода. Поэтому этот пакет программ является

хорошим для выполнения численного моделирования в акустике океана со сложными средами и топографией.

Модель представлена на рис. 8, поверхность океана установлена на $z = 0$ м. Все физические параметры среды указаны в таблице 3. Расчетная область имеет ширину 3000 м и глубину 100 м ниже поверхности моря. Все стороны, кроме верха и оси, покрыты идеально поглощающими слоями (PML) [10]. Источник импульсов давления Риккера с доминирующей частотой 22 Гц расположен в $(r_s, z_s) = (0, -18$ м). Сетка модели состоит из 118 385 спектральных элементов, построенных с помощью программного обеспечения с открытым кодом Gmsh [11]. Данная модель рассчитывалась в течении 0 часа на ПК с операционной системой Linux.

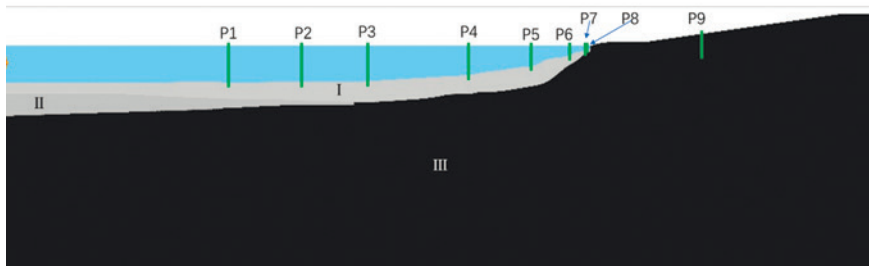


Рис. 8. Параметры моделирования

Таблица 3. Параметры среды, используемые для моделирования

	c_p	c_s	ρ
Осадки	1600 m/s	400 m/s	1,9 g/sm ³
Полубесконечное гранитное пространство	5400 m/s	3300 m/s	2,79 g/sm ³

В результате выполненных модельных расчетов получена картина пространственного распределения гидроакустической энергии от точки излучения, приведенная на рис. 9.

Анализ полученных результатов

По полученным данным модельных расчетов в определенных точках трассы, совпадающих с точками зондирования, были построены вертикальные профили распределения давления от поверхности до

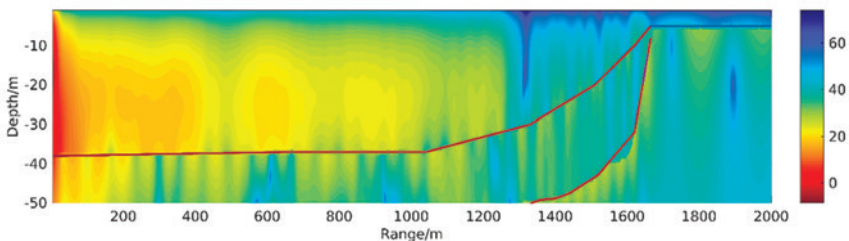


Рис. 9. Пространственное распределение гидроакустической энергии от излучателя до берега вдоль станций приема

дна. Модельные кривые распределения давления на частоте работы излучателя 22 Гц от поверхности до дна приведены рядом с экспериментальными кривыми на рис. 4 – рис. 7. По этим кривым были построены полиномиальные уравнения наиболее подходящей степени, по которым, используя выражение (1), была рассчитана модельная плотность энергии на каждой станции приема. Для станций № 1–7 она равна: 3.715, 1.133, 2.14E-01, 1.08E-01, 2.18E-02, 2.05E-03, 6.30E-07 Дж/м³. Все полученные модельные расчеты дали завышенные результаты по сравнению с экспериментальными данными, что, на наш взгляд, связано с тем, что модель является сильно приближенной и не учитывает многие эффекты распространения гидроакустических волн в мелком море, а также не учитывает вклад затухающих и незатухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся по границе «вода – дно». Тем не менее, в значительной части станций приема модельные кривые похожи на экспериментальные и отображали относительно правдоподобно распределение давления, создаваемого гидроакустическим излучателем на частоте 22 Гц, от поверхности до дна.

Значительное отличие в картине поведения модельных и экспериментальных кривых получено на станциях 6 и 7 (см. рис. 6 и рис. 7, соответственно).

Судя по верхней части рисунка и наклона кривой вправо, а не влево (как дают модельные расчеты), этот вклад вносит в измерения незатухающая волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы «вода – дно», величина создаваемого давления которой равна около 4–5 Па, что также согласуется с расчетными данными,

приведенными в таблице 2 для этих станций в столбце «Излучатель/Гидроакустика, %» и с выводами работы [12].

Проанализируем более подробно экспериментальные результаты, приведенные выше. При анализе будем учитывать, что гидроакустическая энергия распространяется по клиновидному шельфу. Потеря энергии гидроакустического сигнала, распространяющегося по шельфу клиновидной формы, определяется несколькими факторами. Если глубина моря в разы превышает длину волны сигнала, то главными причинами потери энергии являются поглощение звука водой и его рассеяние поверхностью моря. С уменьшением частоты в ослаблении сигнала начинает преобладать влияние дна моря. Это влияние проявляется как увеличение диссипации энергии сигнала грунтом дна. Для длин волн, больших глубины моря, увеличивается доля энергии, которая поглощается из водного слоя в дно моря и преобразуется в упругие колебания поверхности раздела «вода – дно». С ростом длины волны звука генерация волны Рэлея и объемных упругих колебаний начинают играть основную роль в ослаблении энергии сигнала.

Оценку влияния клина на частотную и пространственную зависимость энергии сигнала, высвечиваемой из водного слоя, можно проиллюстрировать следующим образом. Давление акустического поля частотой $\omega = 2\pi f$, создаваемого источником в заданной точке с координатами (x, z) , можно представить в виде суммы нормальных волн (мод) [13]:

$$P(x, z, t) = \sum_l \left(\frac{2P_0 R}{H} \left(\frac{2\pi}{\xi_l x} \right)^{1/2} \sin(\alpha_l z) \sin(\alpha_l z_1) e^{i\left(\xi_l x + \frac{\pi}{4}\right)} \right) e^{-i\omega t}, \quad (6)$$

где H – глубина моря, P – амплитуда давления на расстоянии R от излучателя, ξ_l и α_l – горизонтальные и вертикальные волновые числа моды l .

При этом групповую скорость волны можно записать, как $U_l(f) = c \left(1 - \frac{f_l^2}{f^2} \right)^{1/2}$, где f_l – критическая частота моды номера l . При частотах, меньших критических, акустическая волна становится неоднородной и энергия полностью переходит из акустической в сейсмоакустическую. В случае мелкого моря, когда условия распространения

выполняются только для одной моды ($l=0$), критическую частоту можно найти по формуле $f_0 = \frac{c}{4H\sqrt{1-n^2}}$, где n – показатель преломления, равный отношению скоростей звука в воде к скорости звука в дне моря. Исходя из формулы для критической частоты, мы можем найти критическую глубину $H_{кр}$, при которой, при заданной частоте акустического сигнала, вся энергия будет уходить в дно.

На рис. 10 представлены графики зависимости плотностей энергии деформографа и акустического сигнала от глубины в точках, где производились измерения. Критическая глубина для сигнала частотой 22 Гц составляет 17,8 м. Как можно видеть по графикам, значительная часть плотности гидроакустической энергии уходит в сейсмоакустические волны до глубины 36 м, что приблизительно составляет половину длины волны сигнала 22 Гц (34 м), а после глубины равной критической (17,8 м) практически полностью переходит в сейсмоакустические волны.

На рис. 11 приведены графики плотности энергии зарегистрированных колебаний на деформографе и разность плотности энергий эксперимента и цилиндрической расходимости в процентах. Как можно заметить, графики являются практически идентичными, что может говорить нам о том, что все потери энергии на трассе прохождения сигнала от первой точки измерения до последней переходят в упругие колебания земной коры.

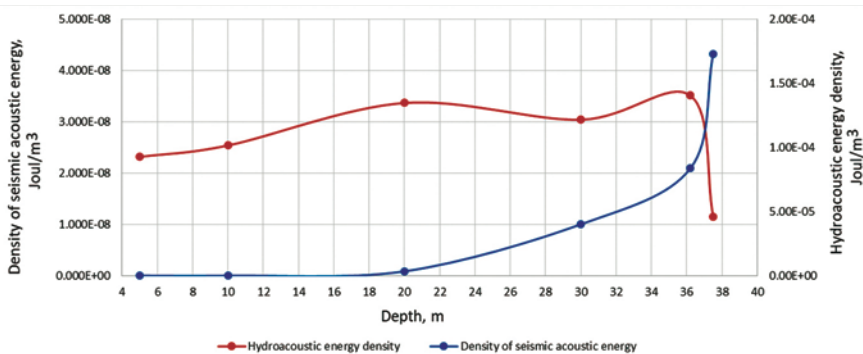


Рис. 10. Графики зависимости плотностей энергии деформографа и акустического сигнала от глубины в точках, где производились измерения

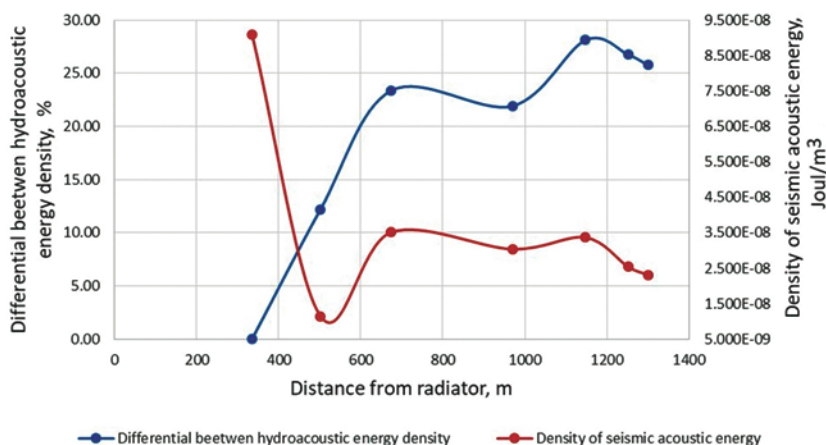
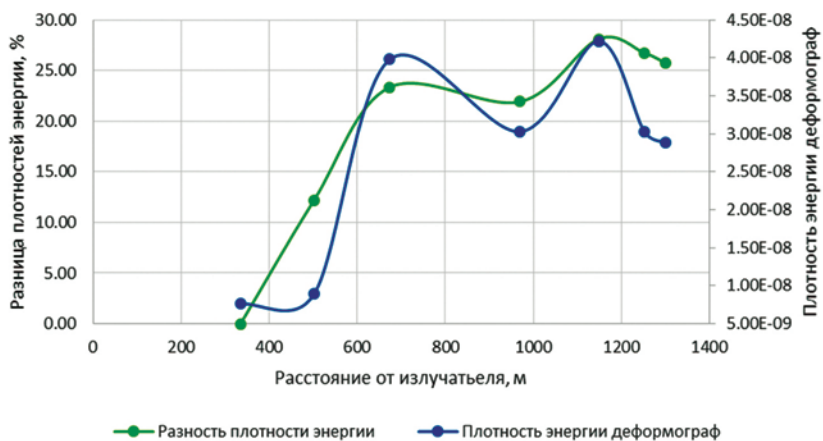


Рис. 11. Графики плотности энергии зарегистрированных колебаний на деформографе и разность плотности энергий эксперимента и цилиндрической расходимости в процентах

Далее проанализируем расчетные данные, приведенные в таблице 2. Анализ делаем с учетом того, что гидроакустическая энергия распространяется по шельфу по цилиндрическому закону и поглощение ее на таких малых дистанциях пренебрежимо мало. Предположим, что к первой точке измерения вся энергия пришла полностью, т.е. потери составили 0%, как в случае эксперимента, так и в случае цилиндрической расходимости, тогда можно в процентном соотношении вычислить, сколько энергии ушло в дно в виде объемных волн и не дошло до

лазерного деформографа. Как видно из пятого столбика, при дистанции от места излучения 335 м в гидроакустическую энергию перешло 83,8% энергии, выдаваемой излучателем. Т.е. в дно ушло в виде объемных волн около 16%. Если сравнивать с результатами работы [12], полученными в эксперименте с низкочастотным гидроакустическим излучателем на 33 Гц, то можно утверждать, что при работе гидроакустического излучателя на 22 Гц в объемные волны ушло значительно меньше энергии, чем при работе гидроакустического излучателя на 33 Гц (78%, [12]). Это возможно только в двух случаях: 1) каждый излучатель имеет определенную диаграмму направленности, ориентация которой определяет величину гидроакустической энергии, распространяющейся по трассе «излучатель – станции приема – лазерный деформограф», 2) глубина моря в месте излучения влияет на величину гидроакустической энергии, «высвечиваемой» излучателем в воду. Заметим, что глубина моря в точке излучения при работе гидроакустического излучателя на 33 Гц равна 30 м при длине гидроакустической волны 45 м. А при работе гидроакустического излучателя на 22 Гц глубина моря составляла 32 м при длине гидроакустической волны 68 м. При сравнении приведенных чисел можно утверждать, что наиболее эффективно излучатель генерирует гидроакустические волны при глубине моря, сравнимой с половиной длины волны, создаваемой им. А при глубине моря, сравнимой с длиной гидроакустической волны, создаваемой им, эффективность этой генерации падает. Для выбора и обоснования одного из выводов необходимы дополнительные комплексные экспериментальные исследования, которые выходят за рамки данной статьи.

Тем не менее, мы можем привести некоторые экспериментальные результаты, полученные при работе гидроакустического излучателя на 22 Гц на больших дистанциях от места приема. Удаленность места расположения гидроакустического излучателя от лазерного деформографа (м. Шульца) составила около 10 и 17 км. На этих дистанциях принято считать гидроакустический излучатель точечным источником. На рис. 12 приведена карта с нанесенными точками излучения, на рис. 13 – участок спектра записи лазерного деформографа при работе излучателя на станции 1, в таблице 4 – полученные экспериментальные данные.

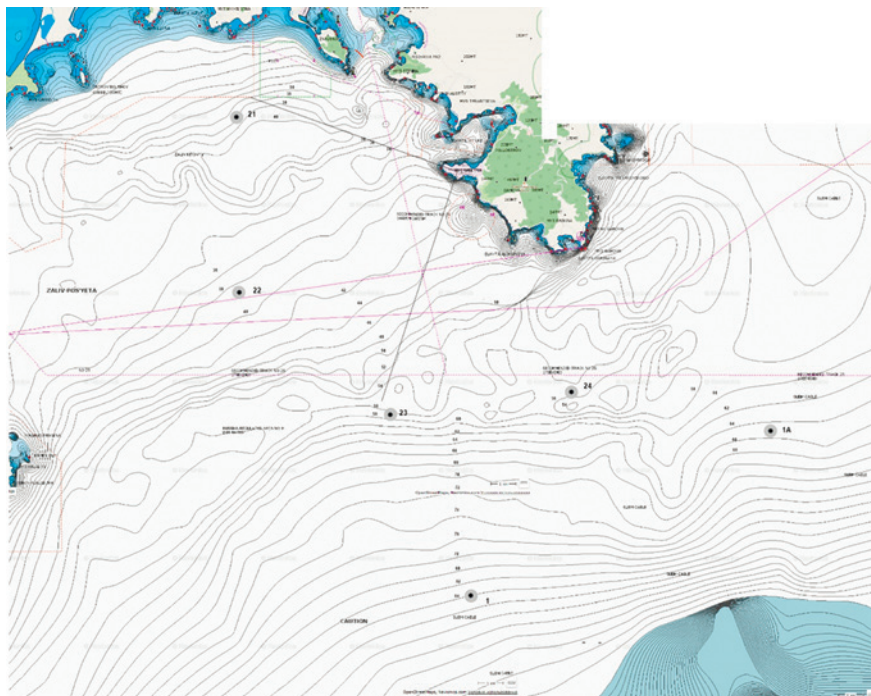


Рис. 12. 21–24, 1 и 1а – точки излучения

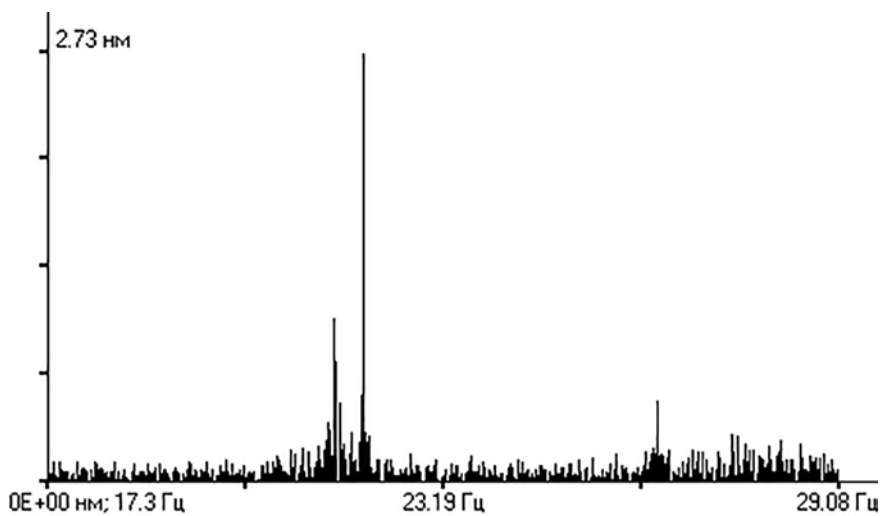


Рис. 13. Участок спектра записи лазерного деформографа

Таблица 3. Экспериментальные данные второго эксперимента.

№	Расстояние от точки излучения, м	Угол между осью лазерного деформографа и направлением на источник, градус	Глубина места, м	Плотность энергии излучателя, Дж/м ³	Амплитуда смещения на деформографе, нм	Плотность сейсмоакустической энергии, Дж/м ³	Сейсмоакустика/Излучатель, %
1	17000	20	84	0,0065	3,36	$4,29 \times 10^{-10}$	0,12
1A	16500	69	65	0,008	3,3	$1,27 \times 10^{-9}$	0,73
21	9200	86	36	0,011	3,06	$5,6 \times 10^{-9}$	6,7
22	10100	44	39	0,011	1,77	$1,82 \times 10^{-10}$	0,02
23	10050	3	57	0,0085	2,07	$1,79 \times 10^{-10}$	0,02
24	9900	54	57	0,01	3,49	$1,47 \times 10^{-9}$	0,42

Интерпретировать результаты, приведенные в таблице 4, сложно. Единственно можно утверждать, что при глубинах моря, сравнимых с половиной гидроакустической волны до лазерного деформографа доходит почти в 10 раз больше излученной излучателем энергии, чем при глубинах, сравнимых с длиной излученной гидроакустической волны. При этом мы рассматривали только случай цилиндрической расходимости при распространении сигнала от излучателя к лазерному деформографу. Кроме того, мы пренебрегли затуханием гидроакустического сигнала и не учли строение морского дна, при котором энергия может уноситься в другие слои дна и не доходить до лазерного деформографа. Как видно из рис. 10, при глубинах, равных 36 м, значительная часть гидроакустической энергии уносится в дно. При этом во втором эксперименте расстояние от данной глубины до лазерного деформографа равно почти 10 км. На таких расстояниях при соответствующем строении морского дна существует большая вероятность распространения излученной энергии по слоям морской земной коры, которая не регистрируется лазерным деформографом.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных и модельных исследований выявлены общие закономерности распространения низкочастотных гидроакустических волн на шельфе убывающей глубины

и их трансформации в сейсмоакустические волны поверхностного типа на границе «вода – дно». Установлено, что при глубинах моря больше половины гидроакустической волны на 9–10% около 4–7% энергии гидроакустических волн трансформируется в сейсмоакустическую энергию волн рэлеевского типа. При уменьшении глубины процентная доля трансформированной энергии резко возрастает. Полученные экспериментальные результаты позволили определить критическую глубину, при которой шельф «запирает» прохождение гидроакустической энергии в воде на частоте 22 Гц. Она очень хорошо совпадает с теоретическими расчетами и равна 17,8 м. Можно ожидать, что с понижением частоты излучаемого гидроакустического сигнала этот эффект будет проявляться на больших глубинах. Так, например, при излучении гидроакустического сигнала на частоте 1 Гц на шельфе убывающей глубины с аналогичными упругими параметрами морского дна не будет этого гидроакустического сигнала в воде, начиная с глубин около 390 м.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке темы АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Литература

1. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., et al. The feasibility of laser strainmeters for sea floor diagnostics // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 452. N1. P. 971–975. DOI: 10.7868/S0869565213280165.
2. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., et al. Development of tomographic technology for the Earth's crust in the shelf regions // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475. N 1. P. 811–815. DOI: 10.1134/S1028334X17070121.
3. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., et al. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // *J. Acoust. Soc. Am.* October 2017. 142 (4). P. 1990–1996. <https://doi.org/10.1121/1.5006904>.
4. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., et al. A Hydroacoustic System that Radiates at Frequencies of 19–26 Hz // *Instruments and Experimental Techniques*. 2017. № 4. P. 596–600. DOI: 10.1134/S0020441217030186.
5. Dolgikh G.I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters // *Technical Physics Letters*. 2011. V. 37. N 3. P. 204–206.
6. Dolgikh G. I., Chupin V.A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave // *Acoust. Phys.* 2005. V. 51 (5). P. 538–542.

7. Lee S. J., Chen H.W., Liu Q., et al. Three-dimensional simulations of seismic wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2008. V. 98 (1). P. 253–264. DOI: 10.1785/0120070033.
8. Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. P. 806–822.
9. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology // *Commun. Comput. Phys.* 2008. V. 3. P. 1–32.
10. Xie Z., Matzen R., Cristini P., et al. A perfectly matched layer for fluid-solid problems: Application to oceanacoustics simulations with solid ocean bottoms // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140 (1). P. 165–175.
11. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 2009. V. 79 (11). P. 1309–1331.
12. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Ovcharenko V.V., Plotnikov A.A. Peculiarities of spreading of acoustic waves over a shelf with decreasing depth // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 470. Part 1. P. 950–953. DOI: 10.1134/S1028334X1609004X.
13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах // Изд-во Наука., 1973. 343 с.

References

1. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., et al. The feasibility of laser strainmeters for sea floor diagnostics // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 452. N1. P. 971–975. DOI: 10.7868/S0869565213280165.
2. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., et al. Development of tomographic technology for the Earth's crust in the shelf regions // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475. N 1. P. 811–815. DOI: 10.1134/S1028334X17070121.
3. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., et al. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // *J. Acoust. Soc. Am.* October 2017. 142 (4). P. 1990–1996. <https://doi.org/10.1121/1.5006904>.
4. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., et al. A Hydroacoustic System that Radiates at Frequencies of 19–26 Hz // *Instruments and Experimental Techniques*. 2017. № 4. P. 596–600. DOI: 10.1134/S0020441217030186.
5. Dolgikh G.I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters // *Technical Physics Letters*. 2011. V. 37. N 3. P. 204–206.
6. Dolgikh G.I., Chupin V.A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave // *Acoust. Phys.* 2005. V. 51 (5). P. 538–542.
7. Lee S.J., Chen H.W., Liu Q., et al. Three-dimensional simulations of seismic wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2008. V. 98 (1). P. 253–264. DOI: 10.1785/0120070033.

8. Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. P. 806–822.
9. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology // *Commun. Comput. Phys.* 2008. V. 3. P. 1–32.
10. Xie Z., Matzen R., Cristini P., et al. A perfectly matched layer for fluid-solid problems: Application to oceanacoustics simulations with solid ocean bottoms // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140 (1). P. 165–175.
11. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 2009. V. 79 (11). P. 1309–1331.
12. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Ovcharenko V.V., Plotnikov A.A. Peculiarities of spreading of acoustic waves over a shelf with decreasing depth // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 470. Part 1. P. 950–953. DOI: 10.1134/S1028334X1609004X.
13. Brekhovskikh L.M. *Waves in layered media* // Publishing: Nauka. 1973. 343 p.

О РЕГИСТРАЦИИ ШУМОВ ДЫХАНИЯ ВОДОЛАЗА-АКВАЛАНГИСТА В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ РАЗМЕЩЕННЫМИ У ДНА ГИДРОФОНАМИ

Дорожко В.М., Горовой С.В., Коренбаум В.И.*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: *v-kor@poi.dvo.ru

Аннотация

Предотвращение несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные мелководные акватории остается актуальной задачей. Для диапазона частот ниже 100 Гц, характерного для шумов, связанных с дыханием водолаза-аквалангиста, существенная часть регистрируемых размещенными у дна гидрофонами может быть соотнесена с сейсмоакустической составляющей волны, бегущей по осадочному чехлу дна и/или тонкому придонному водному слою акватории. Дистанции, на которых удается идентифицировать низкочастотные дыхательные шумы водолаза-аквалангиста, достигают 180–220 м.

Ключевые слова: легководолаз, дыхательные шумы, идентификация, частота дыхания, сейсмоакустическая волна.

ON REGISTERING RESPIRATORY-ASSOCIATED NOISES OF SCUBA-DIVER IN SHALLOW WATER WITH BOTTOM-MOUNTED HYDROPHONES

Dorozhko V.M., Gorovoy S.V., Korenbaum V.I.*

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences*

E-mail: *v-kor@poi.dvo.ru

Abstract

Prevention of scuba-diver trespassing shallow-water littoral areas is considered as actual. In frequency range below 100 Hz, characteristic for respiratory-associated noise of scuba-divers, a significant part of the signal registered with bottom-mounted hydrophones, may be connected to the seismoacoustic component of the wave, travelling through the sedimentary bed and/or through a thin water

layer above it. An identification of low-frequency respiratory-associated noises of scuba-diver in shallow-water areas is achieved at distances up to 180–220 m.

Key words: scuba-diver, respiratory-associated noises, identification, respiratory rate, seismoacoustic wave.

Введение

Предотвращение несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные акватории актуально как для охраны объектов марикультуры от браконьеров, так и в антитеррористических целях [7]. Особенностью легководолазов является низкий уровень излучения физических полей и малая заметность для активных гидролокационных средств. В то же время принципиально неустранимым демаскирующим фактором является функционирование организма легководолаза и, прежде всего, его дыхание. Ранее было показано, что связанные с дыханием низкочастотные шумы могут быть использованы для решения задачи пассивного обнаружения и локализации водолаза-аквалангиста в прибрежной акватории [5].

Постановка проблемы

При работе источника низкочастотных шумов в мелководных акваториях часть его излучения передается гидроакустической плоской волной, бегущей в водной толще, образующей приповерхностный волновод, а часть может передаваться за счет различных механизмов в осадочный чехол дна и возбуждать в нем донные сейсмоакустические волны (в виде нормальных волн, бегущих в осадочном слое, и/или вытекающих в воду, например, волн Стоунли) [1]. При этом низкочастотная сейсмоакустическая составляющая волны может, вообще говоря, распространяться существенно дальше гидроакустической.

Целью работы является анализ возможностей регистрации шумов дыхания водолаза-аквалангиста в мелководной акватории гидрофонами, размещенными у дна.

Регистрация сигналов выполнялась компактной антенной решеткой (рис. 1), состоящей из 12 гидрофонов, каждый из которых выполнен в виде стандартной сборки цилиндрических пьезопреобразователей диаметром 18 мм, герметизированных единой резиновой



Рис. 1. Внешний вид антенной решетки:

1 – гидрофон, 2 – герметичный контейнер с предварительным усилителем, 3 – коаксиальный соединительный кабель, 4 – подводный кабель с продольной герметизацией, 5 – соединительная муфта, 6 – транспортный ящик

оболочкой [2]. Для уменьшения влияния гидродинамических помех, вызванных движением морской воды относительно гидрофонов, на них надеваются звукопрозрачные матерчатые чехлы из синтетической махровой ткани толщиной 5 мм.

Гидрофоны подключены к подводному электрическому кабелю с продольной герметизацией СМПЭВГ-1000 12x0,75 общей длиной 100 м. К гидрофонам подключены герметичные контейнеры, в которых установлены предварительные усилители с коэффициентом усиления 12. Гидрофоны антенны укладывались на дно акватории в линию с дистанцией около 4 м друг от друга. На берегу кабельные выходы гидрофонов через магистральный усилитель с коэффициентом усиления 200 подключались к входам 16-канального электронного самописца PowerLab (ADInstruments) с 16-разрядным АЦП. Записи сигналов (суммарных шумов моря) выполнены с частотой дискретизации 10 кГц.

Выделение дыхательных шумов водолаза-аквалангиста из записей суммарных шумов моря с отдельных гидрофонов решетки реализовано с помощью алгоритма спектральной обработки. Запись шумов

разбивалась на ряд последовательных интервалов по 30 с. На рис. 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие процедуру выполнения алгоритма обработки исходного сигнала (рис. 2а). С помощью прямого преобразования Фурье вычисляется спектр Y_S суммарных шумов (рис. 2б), из которого выделяется спектр заданной ширины ΔF (рис. 2б – выделение красным цветом). Указанная частотная селекция производится в цикле, на каждом шаге которого выделяемый спектр (ΔF) сдвигается по оси частот на заданную величину смещения, вследствие чего за время цикла осуществляется непрерывное перекрытие изучаемого частотного диапазона.

Спектр ΔF подвергается обратному преобразованию Фурье, в результате чего вычисляется временная реализация $S_{\Delta F}$ (рис. 2с) дыхательных шумов на тех участках спектра Y_S , в которых преобладают указанные шумы. Выделенные дыхательные шумы детектируются

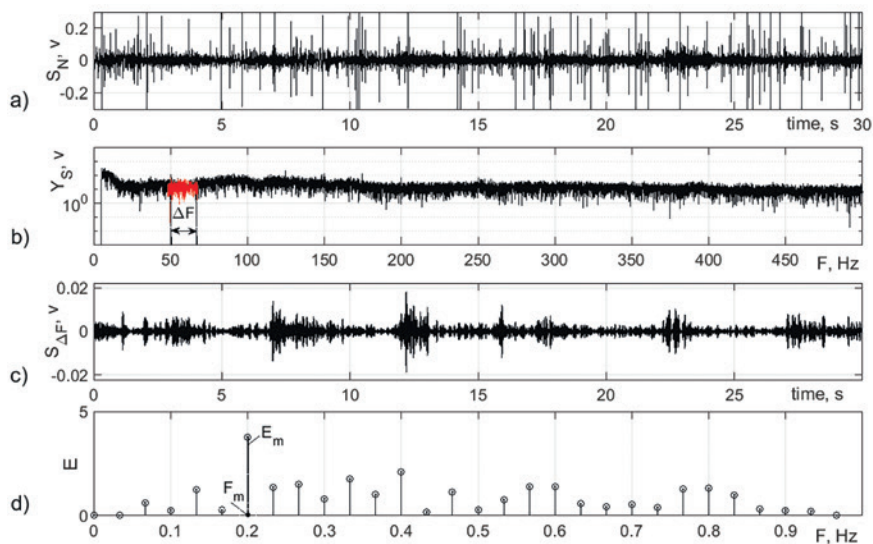


Рис. 2. Диаграммы спектральной обработки суммарных шумов в диапазоне частот 0–500 Гц:

а) суммарные шумы моря (S_N); б) спектр (Y_S) суммарных шумов; спектр, выделяемый фильтром (ΔF) шириной 20 Гц (красный цвет); в) временная реализация выделенных дыхательных шумов ($S_{\Delta F}$); д) спектр отношения сигнал/шум (E) детектированной временной реализации выделенных дыхательных шумов; E_m и F_m – амплитуда и частота максимальной спектральной составляющей спектра E

линейным детектором. С помощью прямого преобразования Фурье по огибающей вычисляется спектр отношения сигнал/шум E (рис. 2d) детектированных дыхательных шумов. В качестве сигнала принимается величина E_m , а величина шумов определяется как среднеквадратическое отклонение массива спектральных составляющих (рис. 2d) без учета E_m . Частота дыхания принимается равной значению F_m спектральной составляющей с максимальной амплитудой E_m в пределах диапазона частот $0,1, \dots, 1,0$ Гц, характерного для дыхательных шумов [4]. Контролируется соответствие результатов обработки записей, полученных с различных гидрофонов антенной решетки.

Основные результаты

С целью записи шумов дыхания водолазы-аквалангисты на ластах совершали проходы на удаление до 180–220 м от гидрофонов антенной решетки, установленной у дна на глубине 10 м, в двух различных мелководных акваториях залива Петра Великого Японского моря. Водолаз-аквалангист передвигался на глубине 6–7 м и был снабжен GPS-приемником, установленным в буксируемом на фале герметичном поплавке.

Полученный в результате обработки материал представляет собой оценки спектра и отношения сигнал/шум дыхательных шумов в диапазоне частот 5–100 Гц, вычисленные через одноминутные интервалы времени движения водолаза-аквалангиста и пересчитанные затем в среднюю на интервале дистанцию до него. Результаты представлены для двух различных мелководных акваторий на рис. 3, 4.

Заметим, что дыхательные шумы водолаза-аквалангиста наблюдаются в диапазоне частот 5–100 Гц с пробелами, которые могут быть связаны как с особенностями генерации шумов водолазом-аквалангистом, так и с характеристиками распространения регистрируемых сигналов (рис. 3а, рис. 4а) вдоль трассы.

Для обеих акваторий (рис. 3б и рис. 4б) характерно достаточно быстрое снижение величины E в начальной стадии ухода водолазов-аквалангистов от антенны (при дистанциях до 50–60 м), что вполне координирует с представлениями о распространении низкочастотного

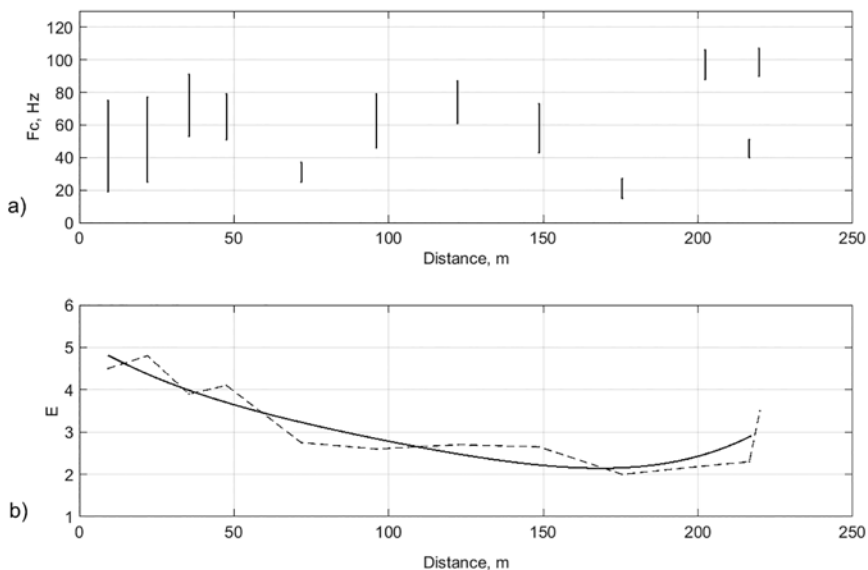


Рис. 3. Зависимость частотного спектра и отношения сигнал/шум от дистанции до движущегося водолаза-аквалангиста в акватории 1:

а) низкочастотная часть спектра дыхательных шумов; б) отношение сигнал/шум спектра детектированных дыхательных шумов; измеренные данные (штриховые линии), МНК-оценка измеренных данных полиномом 5-й степени (сплошная кривая)

звука в мелком море [3], согласно которым оцениваемая частота среза для 1-й нормальной волны приповерхностного волновода при глубине моря 10 м, скорости звука в воде 1500 м/с и скорости звука в осадочном слое дна 1600 м/с составляет около 108 Гц. Согласно [6] на частотах ниже частоты среза «усиление волн при интерференции невозможно». Поэтому вместо характерной для волноводного распространения зависимости звукового поля от расстояния до источника в виде чередующихся и постепенно затухающих максимумов и минимумов, свойственной картине нормальных волн, должна наблюдаться плавная картина спада, характер которой определяется свойствами дна [3].

Однако, как следует из рис. 3б и 4б, экспериментально измеренное отношение сигнал/шум (E) остается практически постоянным на уровне 7–8 дБ до дистанции 150 м в акватории 1, а в акватории 2 имеет

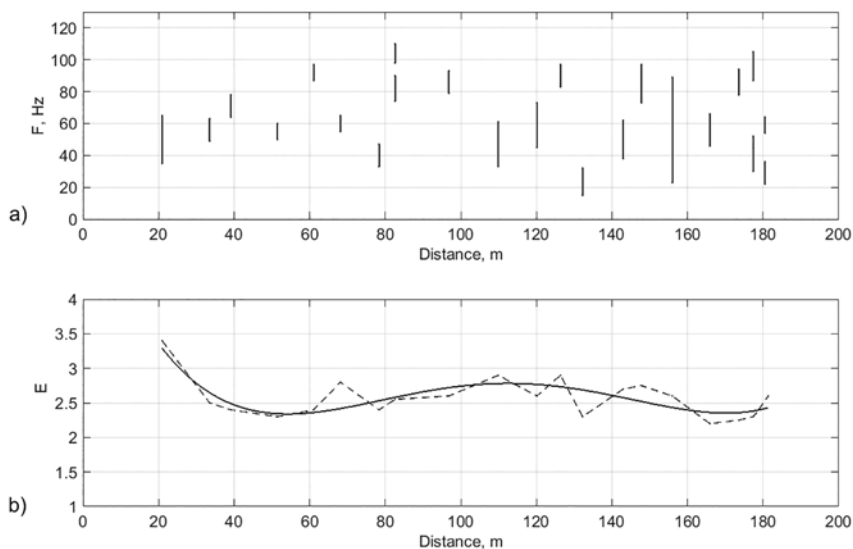


Рис. 4. Зависимость частотного спектра и отношения сигнал/шум от дистанции до движущегося водолаза-аквалангиста в акватории 2: а) низкочастотная часть спектра дыхательных шумов; б) отношение сигнал/шум спектра детектированных дыхательных шумов; измеренные данные (штриховые линии), МНК-оценка измеренных данных полиномом 5-й степени (сплошная кривая)

еще и дополнительный устойчивый подъем на дистанциях от 70 до 150 м. Следовательно, выявленный в исследованных акваториях характер спада амплитуды шумов источника с дистанцией явно не укладывается в рамки классических представлений о распространении низкочастотного звука в приповерхностном волноводе мелкого моря, рассмотренных выше.

Напомним, что в нашем случае прием сигналов выполнялся донными гидрофонами. Следовательно, в обоих случаях (рис. 3, 4) дальнейшее распространение низкочастотных сигналов, связанных с дыхательными шумами водолазов-аквалангистов, может быть предположительно соотнесено с сейсмоакустической составляющей излучаемого сигнала, бегущей по осадочному чехлу дна акватории и/или тонкому придонному слою воды и вследствие этого воспринимаемой лежащими на дне гидрофонами антенной решеткой.

Уточнение особенностей возбуждения, распространения и восприятия этой сейсмоакустической составляющей волны требует дальнейших исследований.

Заключение

Для диапазона частот ниже 100 Гц, характерного для шумов, связанных с дыханием водолаза-аквалангиста, существенная часть сигналов, передаваемых на размещенные у дна (глубина 10 м) гидрофоны, может быть соотнесена с сейсмоакустической составляющей волны, бегущей по осадочному чехлу дна и/или тонкому придонному водному слою исследованных акваторий. При этом дистанции, на которых удается идентифицировать низкочастотные дыхательные шумы водолаза-аквалангиста, достигают 180–220 м, что делает полученные результаты перспективными для использования при решении задач предотвращения несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные акватории.

Благодарность. Исследование поддержано Программой фундаментальных исследований Российской академии наук (№ гос. регистрации проекта АААА-А20-120031890011-8).

Литература

1. Bevans D.A., Buckingham M.J. Estimating the sound speed of a shallow-water marine sediment from the head wave excited by a low-flying helicopter // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. 142 (4). P. 2273–2287.
2. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Санкт-Петербург: Судостроение 1983. С. 91.
3. F.V. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt. *Computational Ocean Acoustics*. Second Edition. New York. Springer. 2011. 794 p.
4. Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., Костив А.Е., Бородин А.Е., Почкутова И.А., Василюстов А.М., Крупеньков А.В., Ширяев А.Д., Власов Д.И. Возможность пассивного акустического мониторинга легководолаза // *ДАН*. 2016. Т. 466. № 5. С. 602–606.
5. Korenbaum V., Gorovoy S., Kostiv A., Shiryaev A., Borodin A. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver using low-frequency respiratory-associated noise emitted into water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. 146. P. 4507–4513
6. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. *Geol. Soc. of America*. 1948. 139 p.

7. Sutin A., Bunin B., Sedunov A., Sedunov N., Fillinger L., Tsionskiy M., Bruno M. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance // 2010 Int. Waterside Sec. Conf., WSS2010. art. no. 5730286.

References

1. Bevans D.A., Buckingham M.J. Estimating the sound speed of a shallow-water marine sediment from the head wave excited by a low-flying helicopter // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. 142 (4). P. 2273–2287.
2. Bogorodskiy V.V., Zubarev L.A., Korepin Ye.A., Yakushev V.I. *Podvodnyie akusticheskie preobrazovateli. Sudostroyeniye*, St. Peterburg. 1983. P. 91.
3. F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt // *Computational Ocean Acoustics*. Second Edition. New York. Springer. 2011. 794 p.
4. Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Tagiltcev A.A., Kostiv A.E., Borodin A.E., Pochekutova I.A., Vasilistov A.M., Krupenkov A.C., Shiryaev A.D., and Vlasov D.I. The Possibility of Passive Acoustic Monitoring of a Scuba Diver. *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 466. Part 2. P. 187–190. DOI: 10.1134/S1028334X16020136.
5. Korenbaum V., Gorovoy S., Kostiv A., Shiryaev A., Borodin A. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver using low-frequency respiratory-associated noise emitted into water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. 146. P. 4507–4513.
6. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // *Geol. Soc. of America*. 1948. 139 p.
7. Sutin A., Bunin B., Sedunov A., Sedunov N., Fillinger L., Tsionskiy M., Bruno M. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance // 2010 Int. Waterside Sec. Conf., WSS2010. art. no. 5730286.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОРМИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть I

Касаткин С.Б.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Аннотация

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приемниками, образующими вертикально ориентированную трехэлементную антенну. Звуковое поле формировалось шумами НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот. Глубина моря и рабочий диапазон частот исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. По результатам анализа вертикальной структуры звукового поля был сделан вывод о том, что звуковое поле сформировано неоднородными нормальными волнами, локализованными на горизонте источника, которые относятся к обобщенным (гибридным) волнам. По результатам анализа вертикального волнового числа, которое принимает чисто мнимые значения в поле неоднородных волн, были получены оценки групповой скорости переноса энергии в рабочем диапазоне частот и выполнена идентификация неоднородных нормальных волн, формирующих суммарное звуковое поле.

Ключевые слова: комбинированный приемник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщенные неоднородные волны, групповая скорость.

IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part I

Kasatkin S.B.

*Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Sukhanova st. 5a*

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Abstract

The results of experimental studies of the sound field recorded by combined receivers forming a vertically oriented three-element antenna are analyzed. The sound field was formed by the noise of the science ship «Yuri Molokov» in the infrasonic frequency range. The depth of the sea and the operating frequency range excluded the possibility of excitation of normal waves of the discrete spectrum in the model Pekeris waveguide. Based on the results of the spectral analysis of the noise signal, an estimate of the potential noise immunity of the combined receiver was obtained using a full set of informative parameters characterizing the energy structure of the sound field. Based on the results of the analysis of the vertical structure of the sound field, it was concluded that the sound field is formed by inhomogeneous normal waves localized at the source horizon, which are referred to as generalized (hybrid) waves. Based on the results of the analysis of the vertical wavenumber, which takes on purely imaginary values in the field of inhomogeneous waves, estimates of the group velocity of energy transfer in the operating frequency range were obtained and identification of inhomogeneous normal waves that form the total sound field was performed.

Keywords: combined receiver, noise field, noise immunity, generalized non-uniform waves, group velocity

ORCID id: 0000-0002-0945-8355

Введение

Звуковые поля, формируемые в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот движущимся источником, надводным или подводным, играют важную роль в проблеме разработки средств освещения подводной обстановки (СОПО). Как правило, приемные системы, предназначенные для обнаружения движущихся шумящих объектов (ШО), располагаются в шельфовой зоне, тогда как сам ШО может находиться либо в шельфовой зоне, либо в глубоком море, либо в переходной зоне шельф – глубокое море. Однако для любого ШО наибольшая дальность распространения соответствует дискретным составляющим вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР), которые относятся к инфразвуковому диапазону частот. В связи с этим исследование особенностей возбуждения и распространения звуковых сигналов инфразвукового диапазона в мелком море, а также пространственная структура звукового поля, вертикальная и горизонтальная, приобретают особое значение. Проблема заключается в том, что в модельном волноводе

Пекериса, который чаще всего используется в классическом описании звуковых полей, волновое движение, представленное нормальными волнами дискретного спектра, на частотах, меньших первой критической частоты, отсутствует. Другая составляющая суммарного звукового поля представлена в классическом решении (Бреховских Л.М.) сплошным спектром, и она является единственной составляющей на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Принципиальная особенность этой составляющей заключается в том, что она формируется в ближней (чисто реактивной) зоне источника. Ее уровень максимален на границе раздела вода – морское дно и убывает с квадратом расстояния, а поток мощности в волноводе равен нулю. Принято считать, что этот фактор существенно ограничивает дальность распространения низкочастотных сигналов инфразвукового диапазона в мелком море. Цель настоящей работы как раз и заключается в исследовании особенностей пространственно-частотной структуры звуковых полей, формируемых в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот, в скалярно-векторном описании, которое обеспечивает также и полноту описания его энергетической структуры. Наиболее интересны в этой области результаты исследования вихревой составляющей вектора интенсивности и связанного с ней явления инверсии горизонтальных потоков мощности [1], результаты исследования эффектов компенсации потоков мощности [2], новые результаты по измерению с помощью КП углового спектра ШО [3], новые результаты по проблеме определения координат и параметров движения цели [4]. Кроме того, использование в эксперименте комбинированных приемников, способных измерять компоненты вектора интенсивности, позволит оценить корректность классического модельного описания звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот, как наиболее информативном, и обосновать модельное решение, наиболее полно соответствующее эксперименту.

Состав оборудования и место проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приемные модули ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3, оснащенные комбинированными приемниками (КП). Эксперимент проводился на акватории

залива Петра Великого. В качестве естественного источника шума использовалось НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР). Горизонты установки приемных модулей ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3 составляют $z_1 = 40$ м, $z_2 = 37$ м, $z_3 = 34$ м, глубина места $h = 43-44$ м. Дистанция между ШО и приемной системой изменялась от 2 км в начальной точке до 1 км в точке траверза и оставалась примерно постоянной при последующем движении ШО по дуге окружности. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было минимальным и не превышало 2–3 балла.

Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приемника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, построение проходных характеристик и соответствующих сонограмм звукового поля в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Для оценки потенциальной помехоустойчивости КП в составе вертикальной антенны была выполнена в блоке обработки сигналов (БОС) обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работах [5, 6], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Полный перечень информативных параметров и их вклад в помехоустойчивость комбинированного приемника приведен в работах [5, 6]. Он включает в себя величины второго порядка, определенные в поле звукового давления $p(z, r)$, комплексного вектора интенсивности $\bar{I}(z, r)$, вещественного ротора вектора интенсивности $rot \bar{I}(z, r)$ и комплексного вектора градиента давления $g(z, r)$:

$$A_1 = p^2, A_2 = I_{1x}, A_3 = I_{1y}, A_4 = I_{1z}, A_5 = I_{2x}, A_6 = I_{2y}, A_7 = I_{2z}, A_8 = rot_x \bar{I}, A_9 = rot_y \bar{I},$$

$$A_{10} = rot_z \bar{I}, A_{11} = g_{1x}^2, A_{12} = g_{1y}^2, A_{13} = g_{1z}^2, A_{14} = g_{2x}^2, A_{15} = g_{2y}^2, A_{16} = g_{2z}^2.$$

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + i\bar{I}_2, g = \bar{g}_1 + i\bar{g}_2, p = p_1 + ip_2.$$

Эти параметры эквивалентны, но не тождественны компонентам 4-мерного тензора второго ранга (тензора потока мощности), приведенного в работе [7]. В любом случае 16 вещественных информативных параметров составляют полное описание энергетической структуры звукового поля с привлечением скалярных, векторных и тензорных величин, т.к. ротор вектора интенсивности является антисимметричной частью тензора второго ранга, производного от вектора интенсивности.

Сонограммы звукового поля в диапазоне частот ВЛЗР на выходе канала звукового давления поясняются рис. 1 для трех приемных модулей вертикальной антенны. Рис. 2 поясняет сонограммы звукового поля на выходе блока обработки сигналов БОС (компаратора). В этом блоке вычисляется максимальное отношение (S/N) из 16 возможных

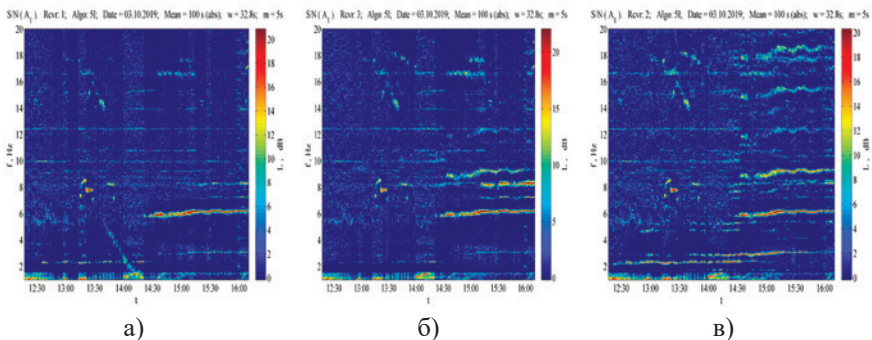


Рис. 1. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе канала звукового давления: а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

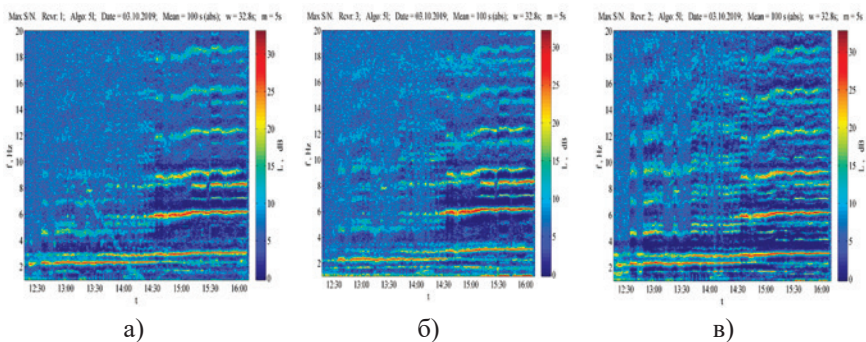


Рис. 2. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе БОС: а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

в диапазоне инфразвуковых частот 1–20 Гц. Так наиболее яркие дискретные составляющие ВЛЗР соответствуют лопастным частотам (3 Гц, 6 Гц, 9 Гц и т.д.), менее яркие дискретные составляющие соответствуют вальным частотам, которые видны на сонограммах с шагом в 1 Гц. Очевидно, что они соответствуют 3-лопастному винту и гребному валу, совершающему 60 об/мин.

Следует отметить, что все дискретные составляющие ВЛЗР в диапазоне 1–20 Гц, представленные на сонограммах, меньше первой критической частоты для модельного волновода Пекериса. Рис. 3 поясняет сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП для трех приемных модулей при использовании традиционного для гидроакустики определения, описанного в работе [7]. Можно отметить, что все приемные модули обнаруживают широкий набор дискретных составляющих ВЛЗР, но только после обработки всех 16 информативных параметров.

Потенциальная помехоустойчивость каждого из приемных модулей оценивается в 25–30 дБ. Очевидно также, что максимальный уровень сигнала соответствует приемному модулю ПМ-3, глубина позиционирования которого минимальна, а уровень сигнала монотонно убывает с увеличением глубины позиционирования КП. Следует отметить, что подобное распределение уровня принципиально отличается от классического описания, в соответствии с которым уровень сигнала в поле нормальных волн сплошного спектра максимален на границе раздела вода – морское дно.

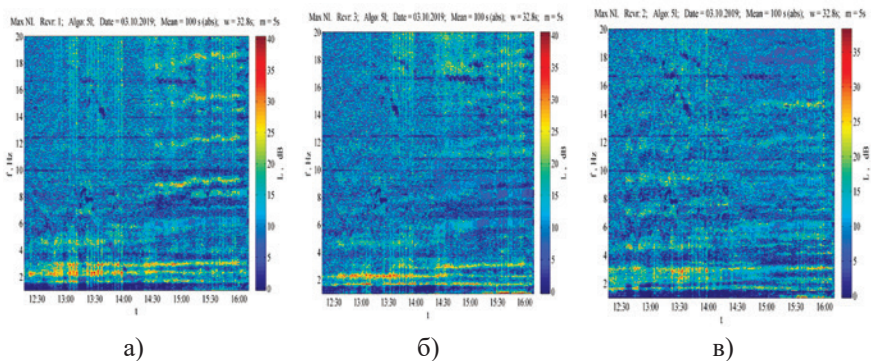


Рис. 3. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП:
а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

Анализ вертикальной структуры поля неоднородных волн

Для более детального анализа вертикальной структуры звукового поля рассмотрим также набор проходных характеристик. Рис. 4 а, б поясняют проходные характеристики в каналах приемных модулей ПМ-1, ПМ-3, разнесенных по вертикали на 6 м, в полосе частот 2–4 Гц (в окрестности первой лопастной частоты), в которой хорошо регистрируются вторая и третья дискретные составляющие ВЛЗР. Верхняя строчка относится к каналу звукового давления, в котором вычисляется

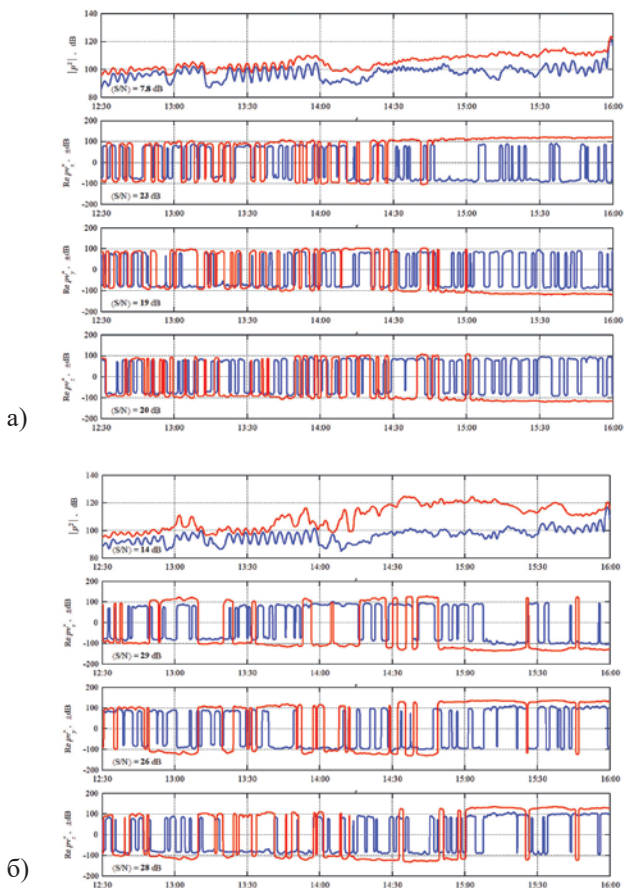


Рис. 4. Проходные характеристики в каналах КП:
а) ПМ-1; б) ПМ-3, полоса частот 2–4 Гц

уровень звукового давления в дБ. Красная линия относится к суммарному процессу сигнал плюс помеха ($S + N$), синяя линия относится к помехе N . Здесь под помехой понимается уровень звукового давления в суммарном поле ($S + N$), усредненный в частотной области достаточно широким окном Хэмминга. Ширина окна Хэмминга выбирается такой, чтобы уровень возможных дискретных составляющих суммарного процесса ($S + N$) уменьшился до уровня фоновой помехи (подобная процедура известна как процедура «отбеливания»). Следующие строчки относятся к векторным каналам (x, y, z), в которых вычисляются положительно определенные логарифмические уровни компонент вещественной составляющей вектора интенсивности, знак которых при отображении на графике определяется знаком самой компоненты вектора интенсивности [5]. При отображении пространственной зависимости искомых величин на проходных характеристиках все величины усреднялись пространственным окном Хэмминга длительностью 100 с. Проходные характеристики в векторных каналах КП убедительно свидетельствуют о том, что потоки мощности в волноводе отличны от нуля, что противоречит классическому описанию. Можно отметить также присутствие во всех векторных каналах вихревой (знакопеременной в горизонтальных каналах) составляющей вектора интенсивности, впервые исследованной в работе [8]. Основная причина появления вихревой составляющей связана с вытекающими нормальными волнами комплексного спектра с горизонтальными волновыми числами ($\xi = \xi^*$), принадлежащими двум сопряженным операторам, которые продолжают в волноводе стоячими волнами.

Стоячие волны появляются в решении, построенном в несамосопряженной модельной постановке. Подобная теория изложена ранее в работах [9, 10] и более подробно в работе [5] в рамках сравнительного анализа различных модельных решений задачи Пекериса. Можно также отметить, что вытекающие волны на столь низких частотах вносят существенный вклад в суммарное звуковое поле, а следовательно, и в процесс формирования вихревой составляющей вектора интенсивности в структурах типа стоячих волн. На всех рисунках приведены средние по трассе значения отношения (S/N) в дБ. Рис. 5 а, б поясняют проходные характеристики в каналах КП для отношения $(S + N) / N$,

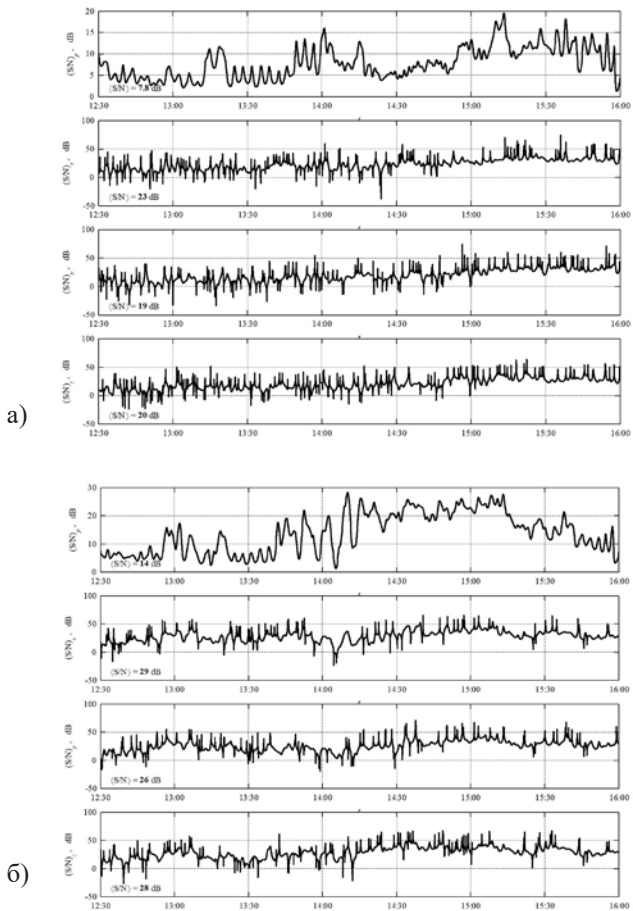


Рис. 5. Прходные характеристики для отношения $(S + N)/N$ в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-3, полоса частот 2–4 Гц

выраженного в дБ. Как отмечалось ранее в работах [5, 6], экстремально высокие значения этого отношения соответствуют процессам компенсации направленных потоков мощности в поле помехи. Экстремально низкие значения этого отношения соответствуют процессам компенсации направленных потоков мощности в суммарном поле $(S + N)$ в окрестности седловых точек в пространственной структуре поля вектора интенсивности [11, 12]. Именно процессы компенсации потоков мощности в поле помехи позволяют увеличить среднее по

трассе отношение (S/N) и помехоустойчивость КП. Сам эффект существенно увеличивается с увеличением числа информативных параметров, описывающих энергетическую структуру звукового поля в блоке обработки сигналов (БОС), с последующим применением компаратора, выбирающего информативный параметр, которому соответствует максимальное отношение (S/N) . Из анализа сонограмм можно также отметить характерное увеличение частоты максимума спектральной плотности мощности с уменьшением расстояния между приемной системой и ШО. Эта характерная особенность свидетельствует о том, что инвариант интерференционной структуры звукового поля принимает отрицательные значения [13], что характерно именно для поля неоднородных волн и волн, локализованных в звуковых каналах (в придонном звуковом канале).

Таблица 1. Максимальные значения отношения (S/N)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}
$(S/N)_1$	17	23	22	22	22	24	27	31	32	29	32	32	35	35	32	36
$(S/N)_3$	23	28	23	29	28	28	29	32	33	32	36	36	37	37	36	37

Максимальные значения отношения (S/N) для всех 16 информативных параметров сведены в таблицу 1 для приемных модулей ПМ-1, ПМ-3 в частотном диапазоне 2–4 Гц. Анализ табличных данных, а также данных, приведенных на рис. 2 для усредненных значений отношения $(S + N)/N$ в скалярном поле звукового давления, позволяет оценить коэффициент затухания неоднородной волны в вертикальном направлении (чисто мнимое вертикальное волновое число α), для которого получаем оценку $\alpha = 0.5 \text{ дБ/м} = 0.058 \text{ м}^{-1}$ на средней частоте 3 Гц. Можно также отметить, что векторные поля имеют более сложную структуру, в которой существенную роль играют вертикальные компоненты векторных величин. Полученные оценки убедительно свидетельствуют о том, что неоднородная волна локализована на горизонте источника, а ее уровень экспоненциально быстро убывает при удалении от горизонта источника. Рис. 6 поясняет сонограммы звукового поля в диапазоне частот 2–4 Гц.

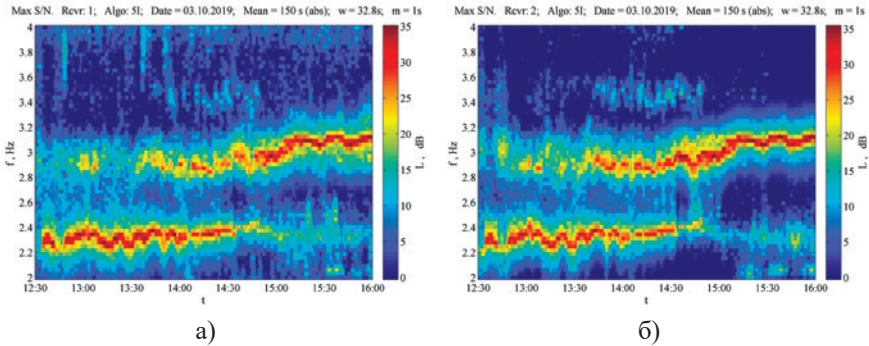


Рис. 6. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе БОС: а) ПМ-1; б) ПМ-3

Аналогичные оценки вертикальной структуры звукового поля были выполнены в звуковом поле, представленном 8 и 9 дискретными составляющими ВЛЗР, в частотном диапазоне 8–10 Гц (в окрестности 3 лопастной частоты), для частотного диапазона 14–16 Гц в окрестности 5 лопастной частоты и для рабочей полосы частот 17–19 Гц, где уверенно регистрируется 6 лопастная частота ВЛЗР. Полученные оценки коэффициента затухания (чисто мнимого вертикального волнового числа) позволяют оценить эффективную скорость распространения неоднородных волн, формирующих звуковое поле, и их частотную зависимость по формуле

$$\left(\frac{c_{эфф}}{c_1} \right)^2 = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{k_1} \right)^2 \right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda_1}{2\pi} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $c_{эфф}$, c_1 – эффективная скорость неоднородной волны и скорость звука в водной среде соответственно, α – вертикальное волновое число, λ_1 – длина волны в водной среде на соответствующей частоте рассмотренного диапазона частот.

Идентификация неоднородных нормальных волн

Полученные экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о том, что уровень неоднородных нормальных волн, формирующих звуковое поле, убывает экспоненциально быстро при удалении от горизонта источника по всем параметрам, характеризующим

энергетическую структуру звукового поля. Этот экспериментальный факт означает, что максимальный уровень неоднородных волн соответствует горизонту источника. Однако в классическом описании звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, неоднородные нормальные волны отсутствуют. В более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство в классическом описании звукового поля в этом диапазоне частот существует только одна волна Рэлея – Шолте, но она локализована на границе раздела вода – морское дно. Для идентификации неоднородных нормальных волн, формирующих звуковое поле в инфразвуковом диапазоне частот в мелком море, воспользуемся результатами работы [14], в которой выполнен анализ неоднородных волн в классическом волноводе Пекериса и в более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство в рамках несамосопряженной модельной постановки соответствующих граничных задач. В рамках этой модельной постановки в классическом волноводе Пекериса на частотах, меньших первой критической частоты, возможна обобщенная (гибридная) волна, локализованная на горизонте источника. Эта волна соответствует нулю коэффициента отражения на границе раздела двух жидких сред, который реализуется при комплексных углах падения. Скорость распространения обобщенной волны в этом случае дается выражением:

$$c_0 = c_1 \sqrt{\frac{1 - \rho_{12}^2}{1 - \rho_{12}^2 c_2^2}}, \quad (2)$$

где $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$; $c_{12} = c_1 / c_2$; ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука в верхнем и нижнем полупространствах соответственно. Для типичных значений плотности и скорости звука в неконсолидированных осадках, слагающих морское дно в заливе Петра Великого, приведенных в работе [15], скорость обобщенной волны в этом случае на 5–8% меньше скорости звука в водной среде c_1 . В более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство неоднородной волной, локализованной на горизонте источника, является обобщенная (гибридная) волна Шолте Lt-типа, соответствующая нулю коэффициента

отражения границы раздела жидкого и твердого полупространств. Эта волна реализуется при комплексных углах падения и при выполнении неравенства

$$\rho_{12} < (1 - c_{i1}^2)^{1/2} (1 - c_{iL}^2)^{-1/2}, \quad (3)$$

где $c_{i1} = c_i / c_1$; $c_{iL} = c_i / c_L$ - c_i, c_L - скорости поперечных и продольных волн в твердом полупространстве соответственно.

Полный анализ волн Шолте, регулярных и обобщенных, на границе раздела жидкого и твердого полупространств был выполнен в работе [16], а в работе [17] было получено экспериментальное подтверждение их существования. Анализ энергетических соотношений в поле неоднородных волн выполнен в работе [14]. Скорость обобщенной волны Шолте Lt-типа (c_{u2}) заведомо меньше скорости поперечной волны в твердом полупространстве. Например, в слабо консолидированных осадках, слагающих морское дно в заливе Петра Великого на малых глубинах, она не превышает первых сотен (м/с) и существенно меньше скорости обобщенной волны c_0 . Можно предположить, что в рассматриваемом случае звуковое поле формируется двумя обобщенными волнами. Одна из них (волна Шолте Lt-типа) является низкоскоростной ($c_{u2} < c_i$), а вторая волна является сравнительно высокоскоростной ($c_0 > c_{u2}$). Групповую скорость как скорость переноса энергии вдоль волновода в звуковом поле, сформированном двумя нормальными волнами с известными групповыми скоростями, можно определить формулой усреднения обратных скоростей с весовыми коэффициентами, которые, должны определяться энергетикой составляющих суммарного волнового движения

$$\frac{1}{c_{эфф}} = \frac{\Pi_0}{c_0} + \frac{\Pi_{u2}}{c_{u2}}; \Pi_0 = \frac{P_0}{P_0 + P_{u2}}; \Pi_{u2} = \frac{P_{u2}}{P_0 + P_{u2}}; \Pi_0 + \Pi_{u2} = 1$$

$$c_{эфф} = \frac{c_0 c_{u2}}{c_0 \Pi_{u2} + c_{u2} \Pi_0} = \frac{c_{u2}}{1 - \Pi_0 + \Pi_0 c_{u2} / c_0}, \quad (4)$$

где P_0, P_{u2} - парциальная мощность, приходящаяся на соответствующие обобщенные волны. В соответствии с формулой (4) эффективная

групповая скорость совместного волнового движения, представленного двумя неоднородными волнами, приобретает дисперсионную (частотную) зависимость. На сравнительно высоких частотах глубина проникновения звукового поля в донное полупространство мала, верхний слой неконсолидированных осадков ведет себя как эквивалентная жидкость, а групповая скорость совместного волнового движения определяется в основном скоростью обобщенной волны c_0 , определенной в рамках модельного волновода Пекериса. На сравнительно низких частотах увеличивается глубина проникновения звукового поля в донное полупространство, увеличивается влияние сдвиговой упругости консолидированных донных осадков и низкоскоростной обобщенной волны Шолте Lt-типа, которая становится доминирующей в суммарном звуковом поле. В этом случае групповая скорость совместного волнового движения определяется в основном скоростью обобщенной волны $c_{ш2}$, определенной в рамках модельного волновода жидкий слой – твердое полупространство.

Представляет интерес физическая трактовка существенного торможения скорости потока мощности в жидком слое донным полупространством, жидким или твердым. Можно предположить, что в поле неоднородных волн, интерферирующих друг с другом, лучевая структура поля вектора интенсивности значительно усложняется формированием узловых и седловых точек (дислокаций фазового фронта в определении работы [11]). Сами лучевые траектории должны описывать локализацию звукового поля на горизонте источника и проникновение потоков мощности в донное полупространство, которое увеличивается с понижением рабочей частоты. Этим условиям удовлетворяет лучевая трактовка поля вектора интенсивности, которая поясняется рис. 7. Траектория 1 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае высоких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Траектория 2 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае низких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_{ш2}$). Согласно предложенной лучевой трактовке в энергетической структуре звукового поля неоднородных волн растет роль вертикальных потоков мощности, которые становятся доминирующими в предельном случае низких частот.

Численные оценки коэффициентов затухания потоков мощности в вертикальном направлении приведены в таблице 2. Там же приведены

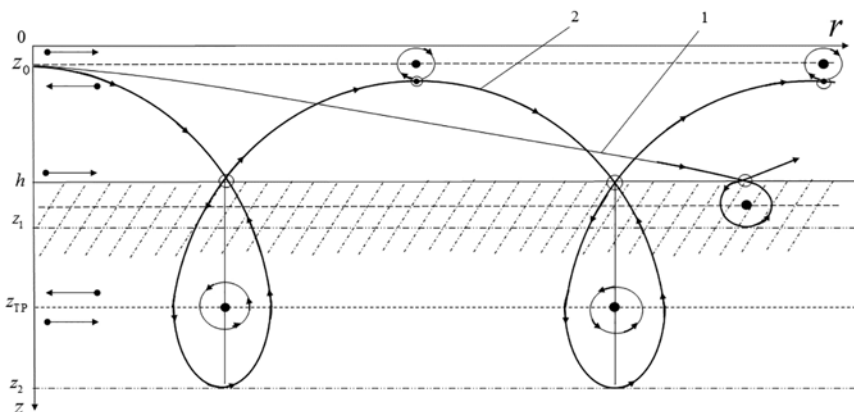


Рис. 7. Лучевая трактовка энергетической структуры поля обобщенных нормальных волн, 1 – предельный случай высоких частот, 2 – предельный случай низких частот, o – седловые точки, • – узловые точки

оценки групповой скорости в рассматриваемом частотном диапазоне. Полученные оценки качественно совпадают с оценками групповой скорости по формуле энергетического усреднения (4) и с оценками скорости поперечных волн в консолидированных осадочных породах, слагающих морское дно в заливе Посьета [15].

Таблица 2. Численные оценки коэффициентов затухания

$f, \text{Гц}$	$ I_1 , \text{дБ}$		$\lambda, \text{м}$	$\frac{\alpha\lambda_1}{2\pi}$	$\frac{c_1}{c_{\text{эфф}}}$	$c_{\text{эфф}}, \text{М/с}$
	ПМ-1	ПМ-3				
3	25	30	500	3.68	3.8	365
9	18	24	167	1.51	1.82	825
15.6	10,5	17	96	0.94	1.37	1100
18.6	9,0	14	81	0.62	1.18	1270

Заключение

Выполнена экспериментальная оценка вертикальной структуры звукового поля на частотах, заведомо меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Получены оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора из 16 информативных параметров,

описывающих энергетическую структуру звукового поля. Эти оценки хорошо соответствуют ранее полученным в работах [5, 6] оценкам и составляют 25–30 дБ. Предложена идентификация обобщенных нормальных волн, формирующих звуковое поле, качественно объясняющая экспериментально определенную вертикальную структуру звукового поля, уровень которого убывает при удалении КП от горизонта источника. Получены экспериментальные оценки групповой скорости и ее частотной зависимости в инфразвуковом диапазоне частот с учетом сдвиговой упругости донного полупространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Новые вызовы климатической системы Земли», подпрограммы № 18-1-004 «Изучение фундаментальных основ взаимодействия разномасштабных гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов» и бюджетного финансирования.

Литература

1. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.
2. Щуров В.А., Кулешов В.П., Ткаченко Е.С., Иванов Е.Н. Признаки, определяющие компенсацию встречных потоков энергии в акустических полях океана // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 6. С. 835–843.
3. Гордиенко В.А., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н., Торопов В.Н. О локализации источников излучения на корпусе корабля при одновременном использовании комбинированного приемника и методов спектрального анализа с высоким разрешением // Ак. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 179–191.
4. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 33–45.
5. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток. 2019. 360 с.
6. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1(27). С. 38–47.
7. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит. 2007. 480 с.
8. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–841.
9. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М. Наука. 2009. 496 с.

10. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Модельные задачи в акустике слоистых сред. Владивосток. Дальнаука. 2012. 253 с.
11. Жуков А.Н., Иванников А.Н., Кравченко Д.И., Павлов В.И. Особенности тонкой энергетической структуры звукового поля // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 4. С. 634–638.
12. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. Вып. 5 (11). С. 3769–3783.
13. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука. 1982. С. 71–91.
14. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Пограничные волны в проблеме обнаружения подводных источников шума // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 37–48.
15. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток. Дальнаука. 2004. С. 226–235.
16. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces. Pure Appl. Geophys. 1972. V. 194. P. 172–188.
17. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106 (2). P. 666–673.

References

1. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Acoustic. Journal 2011. B. 57. No. 6. P. 837–843.
2. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Tkachenko E.S., Ivanov E.N. Signs determining the compensation of counter energy fluxes in acoustic fields of the ocean // Acoustic. Journal. 2010. B. 56. No. 6. P. 835–843.
3. Gordienko V.A., Krasnopistsev N.V., Nekrasov V.N., Toropov V.N. On the localization of radiation sources on the ship's hull while using a combined receiver and high-resolution spectral analysis methods // Acoustic. Journal. 2011. T. 57. No. 2. P. 179–191.
4. Kaznacheev I.V., Kuznetsov GN, Kuzkin VM, Peresyolkov SA. Interferometric method for detecting a moving sound source with a vector – scalar receiver // Acoustic. Journal. 2018. Vol. 64. No. 1. P. 33–45.
5. Kasatkin B.A., N.V. Zlobin, S.B. Kasatkin, D.V. Zlobin, G.V. Kosarev Acoustics of the shallow sea in scalar – vector description. Theory and experiment. Vladivostok. 2019. P. 360.
6. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Experimental assessment of the noise immunity of a combined receiver in the infrasonic frequency range // Underwater Research and Robotics. 2019. No. 1 (27). P. 38–47.
7. Gordienko V.A. Vector – phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit. 2007. P. 480.
8. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Acoustic. Journal. 2011. V. 57. No. 6. P. 837–841.

9. Kasatkin B.A., Zlobina N.V. Correct formulation of boundary value problems in acoustics of layered media. *M. Nauka*. 2009. P. 496.
10. Kasatkin BA, Zlobina NV, Kasatkin SB Model problems in acoustics of layered media. *Vladivostok. Dalnauka*. 2012. P. 253
11. Zhukov A.N., Ivannikov A.N., Kravchenko D.I., Pavlov V.I. Features of the fine energy structure of the sound field // *Acoustic. Journal*. 1989. Vol. 35. No. 4. P. 634–638.
12. Zhuravlev VA, Kobozev IK, Kravtsov Yu.A. Energy fluxes in the vicinity of phase front dislocations // *ZhETF*. 1993. T. 104. Issue 5 (11). P. 3769–3783.
13. Chuprov S.D. Interference structure of a sound field in a layered ocean. *Ocean acoustics. State of the art*. Moscow: Nauka. 1982. P. 71–91.
14. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Boundary Waves in the Problem of Detecting Underwater Noise Sources // *Underwater Research and Robotics*. 2019. No. 4 (30). P. 37–48.
15. Svininnikov A.I. Petrophysics of the western frequencies of the Pacific Ocean and the marginal seas of the east of Asia. *Vladivostok. Dalnauka*. 2004. P. 226–235.
16. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces // *Pure Appl. Geophys*. 1972. V. 194. P. 172–188.
17. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // *J. Acoustic. Soc. Am*. 1999. V. 106 (2). P. 666–673.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОРМИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть II

Касаткин С.Б.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Аннотация

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приемниками, образующими вертикально ориентированную двухэлементную антенну. Звуковое поле формировалось дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда шумового сигнала НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот 2–20 Гц, а также буксируемым низкочастотным излучателем полигармонического сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц. Глубина моря и рабочий диапазон частот 2–20 Гц исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса в этом диапазоне частот. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. По результатам анализа вертикальной структуры звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот был сделан вывод о том, что звуковое поле сформировано неоднородными нормальными волнами Шолте, регулярной и обобщенной (гибридной). В дальней зоне источника доминирует регулярная волна Шолте, локализованная на границы раздела вода – морское дно. В ближней зоне источника возрастает роль обобщенной волны Шолте, локализованной на горизонте источника, а звуковое поле формируется парой волн Шолте, регулярной и обобщенной.

Ключевые слова: комбинированный приемник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщенные неоднородные волны, гибридные волны.

IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part II

Kasatkin S.B.

*Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Sukhanova st. 5a*

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Abstract

The results of experimental studies of the sound field recorded by combined receivers forming a vertically oriented two-element antenna are analyzed. The sound field was formed by discrete components of the vane-blade scale of the noise signal of the science ship «Yuri Molokov» in the infrasonic frequency range of 2–20 Hz, as well as by a towed low-frequency emitter of a polyharmonic signal in the frequency range 30–60 Hz. The depth of the sea and the operating frequency range of 2–20 Hz excluded the possibility of exciting normal waves of the discrete spectrum in the model Pekeris waveguide in this frequency range. Based on the results of spectral analysis of the noise signal, an estimate of the potential noise immunity of the combined receiver was obtained using a full set of informative parameters characterizing the energy structure of the sound field. Based on the results of the analysis of the vertical structure of the sound field in the infrasonic frequency range, it was concluded that the sound field is formed by inhomogeneous normal Scholte waves, regular and generalized (hybrid). In the far zone of the source, a regular Scholte wave dominates, localized at the water – seabed interface. In the near-field zone of the source, the role of the generalized Scholte wave localized at the source horizon increases, and the sound field is formed by a pair of Scholte waves, regular and generalized.

Keywords: combined receiver, noise field, noise immunity, generalized non-uniform waves, group velocity

ORCID id: 0000-0002-0945-8355

Введение

Звуковые поля, формируемые в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот движущимся источником, надводным или подводным, играют важную роль в проблеме разработки средств освещения подводной обстановки (СОПО). Проблема заключается в том, что в модельном волноводе Пекериса, который чаще всего используется в классическом описании звуковых полей, волновое движение, представленное нормальными волнами дискретного спектра, на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, отсутствует. В первой части экспериментального исследования этой проблемы [1] были получены убедительные доказательства доминирующей роли неоднородных обобщенных волн (гибридных волн), локализованных на горизонте источника, в формировании звукового поля инфразвукового диапазона. Эксперимент [1] проводился в ближ-

ней зоне источника на расстоянии 1–2 км от него в осеннее время года (октябрь), когда влияние придонного звукового канала в значительной мере ослаблено. Цель настоящей работы заключается в дальнейшем исследовании пространственно-частотной структуры звуковых полей инфразвукового диапазона в других гидрологических условиях и на достаточно больших расстояниях от источника. Отметим, что неоднородные обобщенные волны (гибридные волны) появляются при решении граничной задачи (ГЗ) для модельного волновода Пекериса, а также для более сложного волновода жидкий слой – твердое полупространство в несамосопряженной модельной постановке. Такая модельная постановка является естественной и математически корректной для открытых систем типа волновода, нагруженного на полупространство. Основные особенности модельного решения ГЗ для открытых волноводов в классе обобщенных функций на частотах, меньших первой критической частоты, приведены в работе [2].

Состав оборудования и место проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приемные модули ПМ-1, ПМ-2, оснащенные комбинированными приемниками (КП). Эксперимент проводился в акватории Уссурийского залива. В качестве источника звуковых сигналов использовались НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вальнолопастного звукоряда (ВЛЗР), а также низкочастотный излучатель полигармонического сигнала в полосе частот 30–60 Гц. Горизонты установки приемных модулей ПМ-1, ПМ-2 составляют 16 м и 24 м соответственно, глубина места $h = 43–44$ м. Дистанция между ШО и приемной системой изменялась от 10 миль в начальной точке трассы до 1 мили в конечной точке. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было минимальным и не превышало 2–3 балла. Схема проведения эксперимента поясняется рис. 1. В качестве рабочего использован обратный галс в интервале времени 13 час. 00 мин. – 15 час. 30 мин., в течение которого расстояние между НИС «Юрий Молоков» и приемной системой РМ123 изменялось от 10 миль до 1 мили.

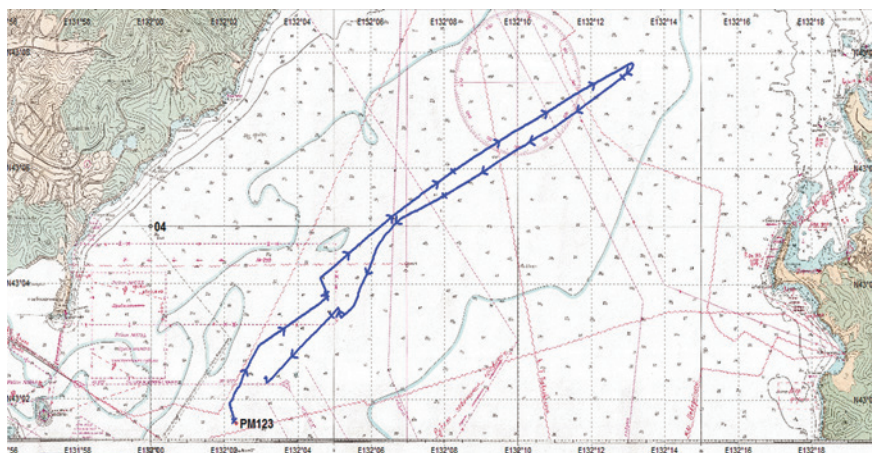


Рис. 1. Схема постановки приемной системы и маневрирования НИС «Юрий Молоков»

Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приемника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, построение проходных характеристик и соответствующих сонограмм звукового поля в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Для оценки потенциальной помехоустойчивости КП в составе вертикальной антенны была выполнена в блоке обработки сигналов (БОС), компаратора, обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работе [1], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20 Гц для отношения сигнал-помеха (S/N) в канале звукового давления для приемных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 2 а, б соответственно. Можно отметить, что на больших расстояниях уровень дискретных составляющих ВЛЗР, зарегистрированных ПМ-2, существенно выше уровня соответствующих дискретных составляющих, зарегистрированных ПМ-1. Поскольку все дискретные

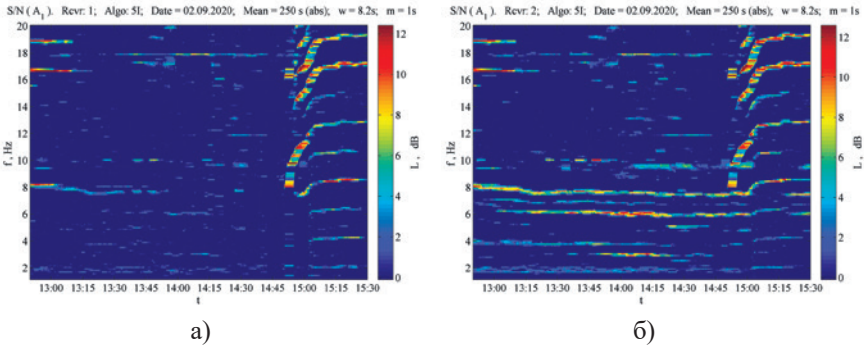


Рис. 2. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) в канале звукового давления: а) ПМ-1; б) ПМ-2

составляющие ВЛЗР ниже первой критической частоты модельного волновода Пекериса, сам факт существования волнового движения на столь больших расстояниях можно объяснить только в рамках обобщенного модельного решения ГЗ, соответствующего несамосопряженной модельной постановке [2]. Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20 Гц для отношения сигнал-помеха (S/N) на выходе компаратора для приемных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 3 а, б соответственно. Можно отметить, что обработка сигналов по полному набору информативных параметров позволила существенно повысить отношение (S/N) на выходе компаратора для слабых сигналов, зарегистрированных обоими приемными модулями на больших расстояниях. Наконец, рис. 4 поясняет оценку

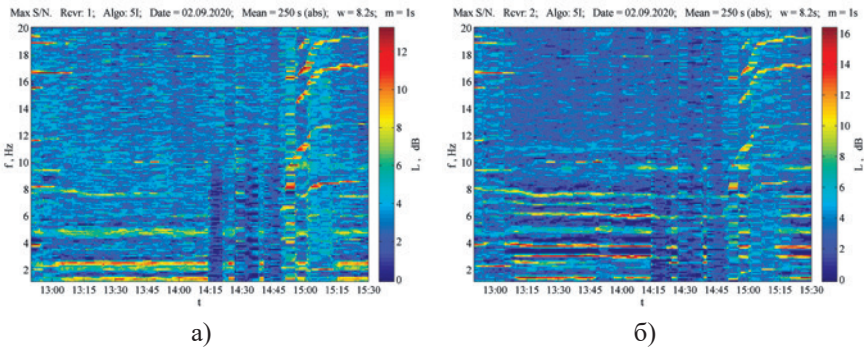


Рис. 3. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) на выходе компаратора: а) ПМ-1; б) ПМ-2

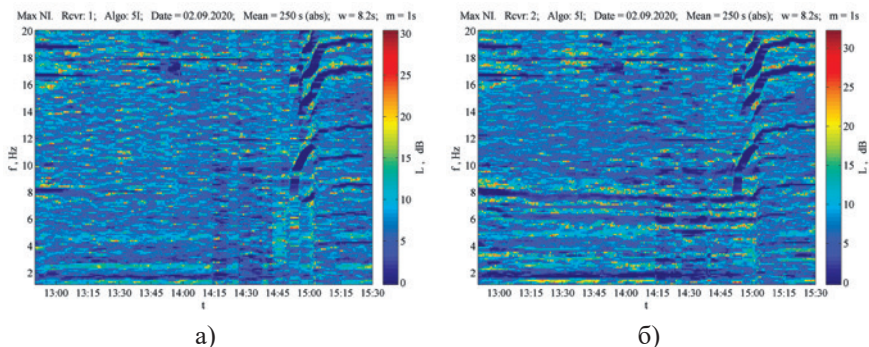


Рис. 4. Сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП: а) – ПМ-1; б) – ПМ-2

помехоустойчивости КП в инфразвуковом диапазоне частот. Можно отметить, что потенциальная помехоустойчивость КП правильно оценивается (15–20 дБ) только при регистрации слабых по уровню сигналов, которые усиливаются приемным трактом без амплитудных искажений. При регистрации сильных по уровню сигналов, которые усиливаются приемным трактом с ограничением по амплитуде, оценки помехоустойчивости оказываются существенно заниженными 3–5 дБ.

Для анализа вертикальной структуры звукового поля были построены проходные характеристики для отдельной дискретной составляющей ВЛЗР в полосе 7,5–8,5 Гц в дальней зоне источника в диапазоне расстояний 10,0–1,0 миль. Проходные характеристики в каналах комбинированных приемников поясняются рис. 5. Верхние строчки относятся к каналу звукового давления. Нижние строчки относятся к векторным каналам (x, y, z). Красный цвет относится к суммарному полю сигнал плюс помеха (S + N), синий цвет к помехе (N), которая выделялась из суммарного процесса частотным окном Хэмминга. Логарифмические уровни векторных компонент, будучи положительно определенными, отображаются в сторону положительных значений, если сама компонента является положительной, и в сторону отрицательных значений, если сама компонента является отрицательной. Цифрами на рисунках отмечены средние по трассе значения отношения (S/N). Можно отметить наличие знакопеременной составляющей в векторных каналах КП. Эта особенность проходных характеристик

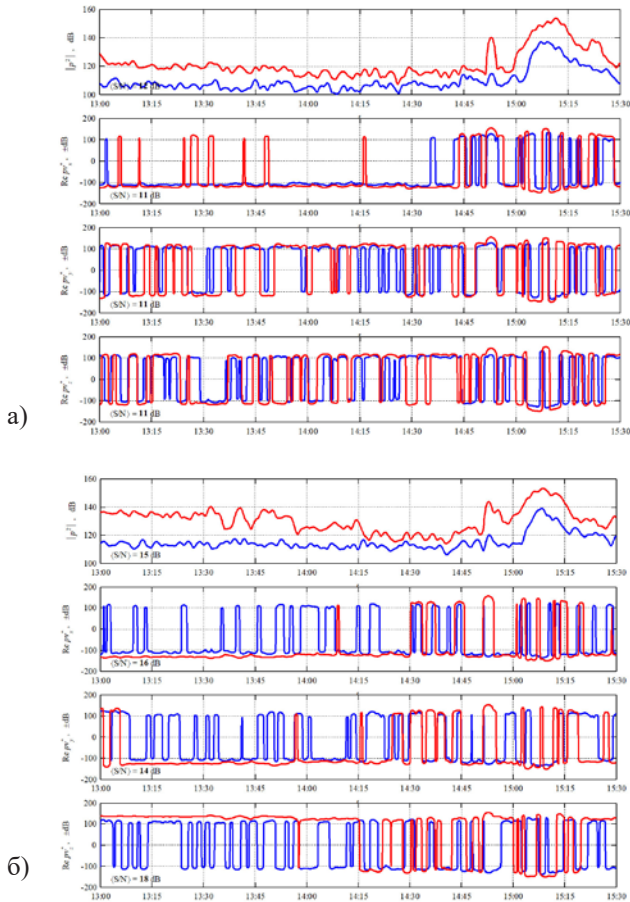


Рис. 5. Проходные характеристики в каналах КП:
 а) – ПМ-1; б) – ПМ-2. Время усреднения 150 с

связана с наличием в суммарном звуковом поле инфразвукового диапазона вытекающих (в полупространство) нормальных волн комплексного спектра. В свою очередь, вытекающие волны продолжаютя в волновод стоячими волнами (в несамосопряженной модельной постановке), в которых возрастает роль вихревых структур (знакопеременных) в векторных каналах КП [3]. По проходным характеристикам для отношения (S/N) можно оценить средний по трассе коэффициент затухания неоднородной волны (вертикального волнового числа) и вычислить групповую скорость, как это сделано в работе [1].

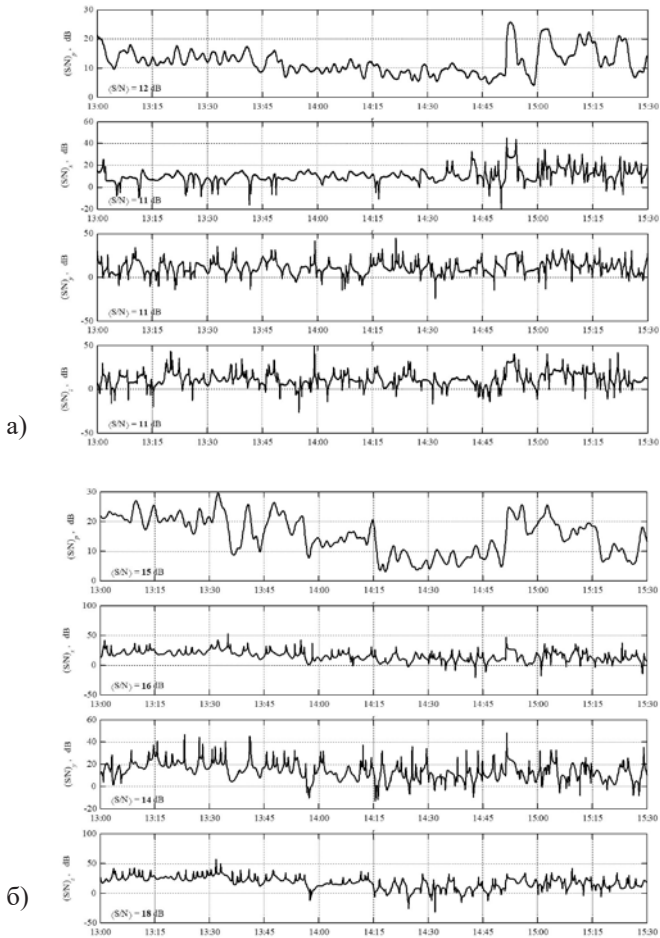


Рис. 6. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

Ее численная оценка (1140 м/с) неплохо соответствует ранее полученным данным [1] в этом диапазоне частот.

Однако она заметно превышает скорость поперечной волны по данным работы [4], а, следовательно, и скорость регулярной волны Шолте в консолидированных осадках верхнего слоя морского дна. Можно ожидать, что с дальнейшим увеличением частоты и появлением первой пары нормальных волн высшего порядка, локализованных в придонном звуковом канале, локализация суммарного звукового

поля вблизи дна сохранится, а групповая скорость будет расти. Рис. 7, 8 поясняют проходные характеристики для частоты 35 Гц полигармонического сигнала, излучаемого буксируемым излучателем. Проходные характеристики, поясняемые рис. 7, 8, полностью подтверждают это предположение, а групповая скорость совместного волнового движения увеличивается до 1420 м/с.

Наконец, можно проанализировать пространственную структуру звукового поля в ближней зоне источника, которая поясняется рис. 9, 10 для дискретной составляющей ВЛЗР в полосе 3,5–4,5 Гц.

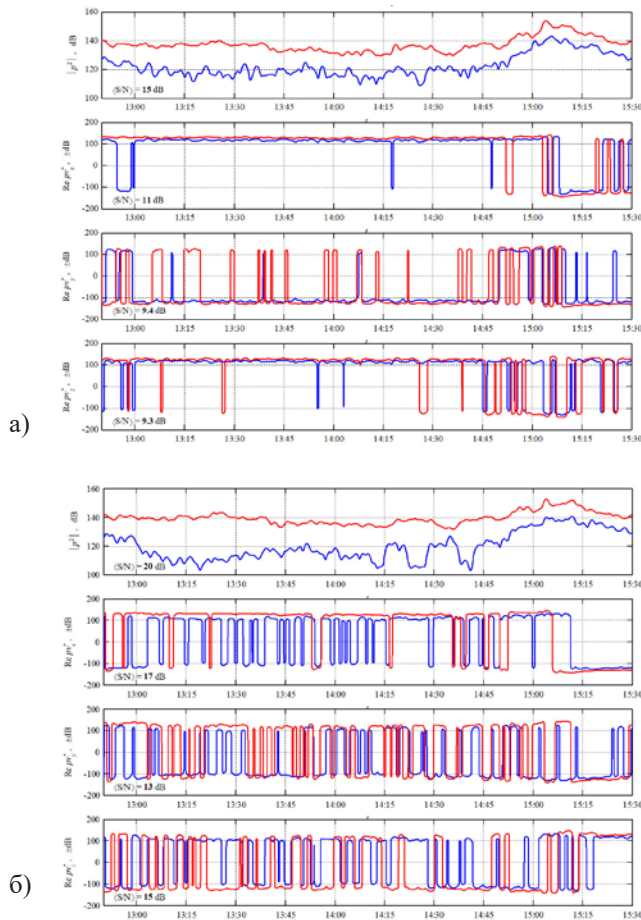


Рис. 7. Проходные характеристики в каналах КП:
а) ПМ-1; б) ПМ-2, Время усреднения 150 с

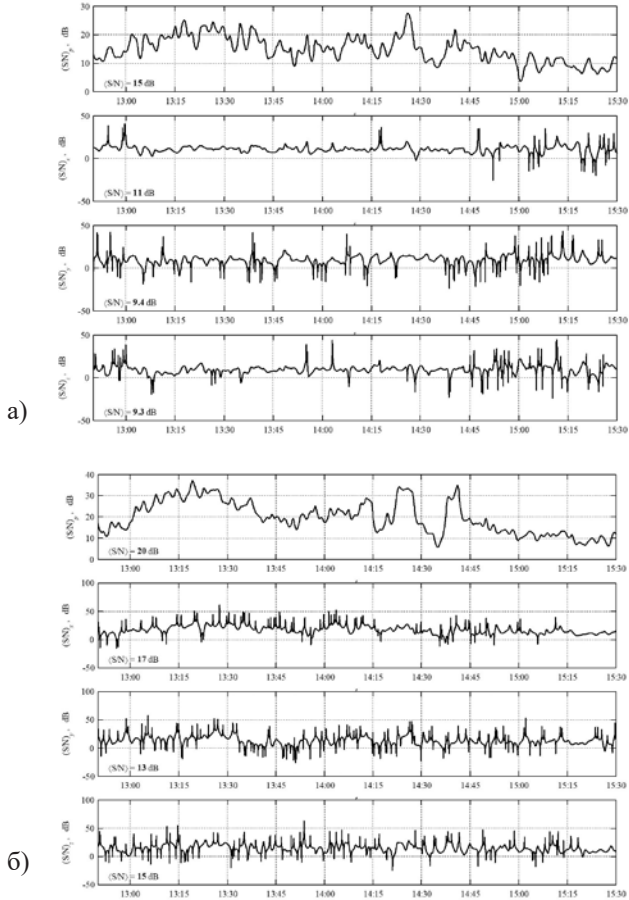


Рис. 8. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

Можно отметить, что в этом диапазоне малых расстояний и рабочих частот уровни сигналов на обоих приемных модулях, разнесенных по глубине на 8 м, отличаются несущественно ($\pm(1-2)$ дБ). Этот экспериментальный факт вполне объясним соизмеримым вкладом обобщенной волны Шолте, локализованной на горизонте источника, и регулярной волны Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Пример звукового поля, сформированного этой парой неоднородных волн Шолте, приведен в работе [2]. Там же приведены примеры вихревых структур в поле горизонтальных потоков мощно-

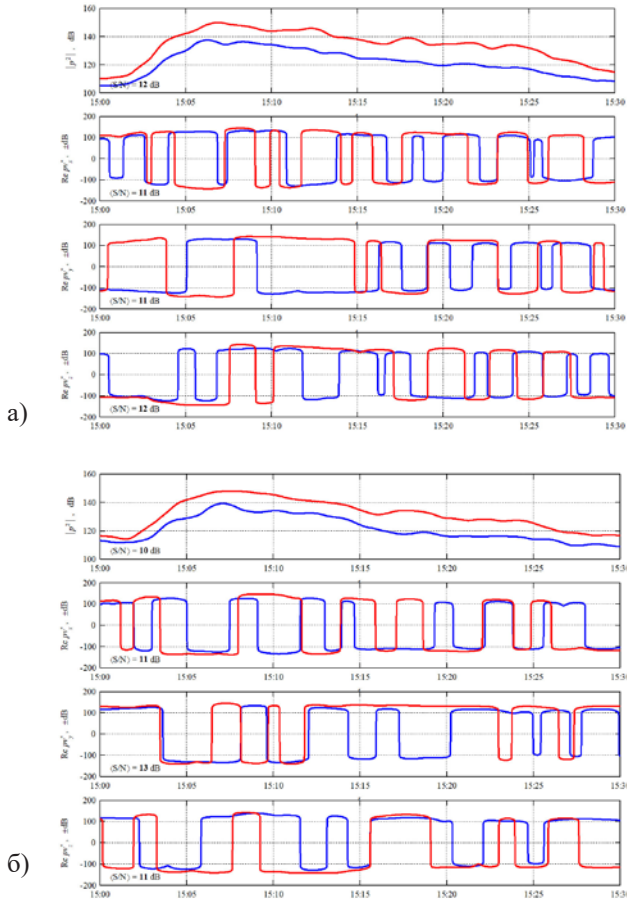


Рис. 9. Проходные характеристики в каналах КП:
 а) ПМ-1; б) ПМ-2. Время усреднения 150 с

сти, которые хорошо подтверждаются наличием вихревых (знакопеременных) структур в векторных каналах КП на рис. 9.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование пространственно-частотной структуры звуковых полей в мелком море в наиболее интересном инфразвуковом диапазоне частот в диапазоне расстояний 1–18 км. Показаны преимущества обработки всей скалярно-векторной

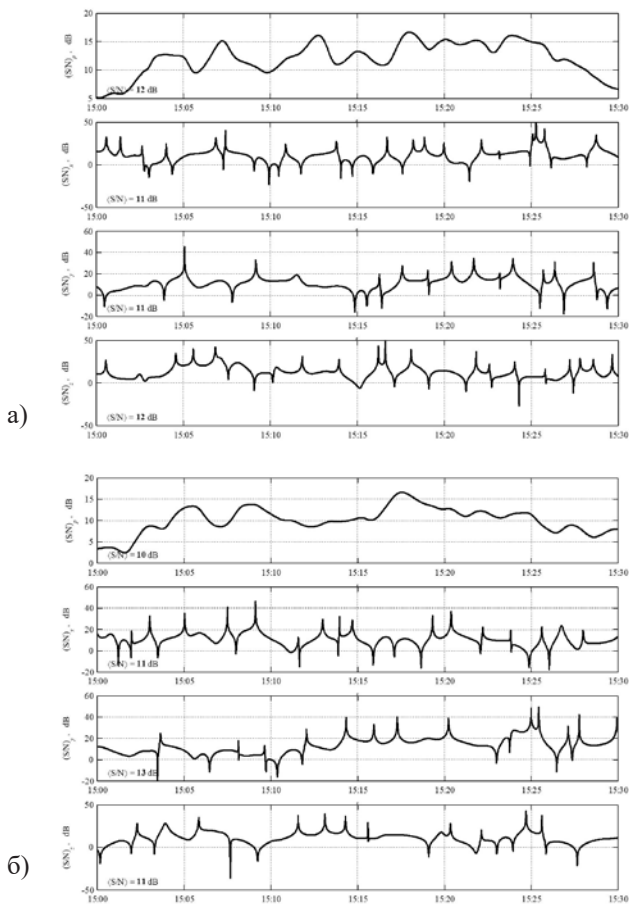


Рис. 10. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-2

информации по полному набору информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звуковых полей. Полученные в настоящем эксперименте оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника хорошо подтверждают ранее полученные оценки (15–25 дБ). Использование в эксперименте пары комбинированных приемников, разнесенных по вертикали на 8 м, позволило исследовать вертикальную структуру звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, и подтвердить решающую роль неоднородных волн

Шолте, регулярной и обобщенной, в формировании звукового поля в этом диапазоне частот. Экспериментально подтверждено существование обобщенных (гибридных) волн и также вихревых структур в звуковом поле инфразвукового диапазона. Этот экспериментальный факт подтверждает также целесообразность использования несамосопряженной модельной постановки при решении граничных задач прикладной гидроакустики.

Литература

1. Касаткин С.Б. Идентификация нормальных волн, формирующих звуковое поле в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот. Часть I. // Настоящий сборник.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток. 2019. 360 с.
3. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.
4. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток. Дальнаука. 2004. С. 226–235.

References

1. Kasatkin S.B. Identification of normal waves forming a sound field in a shallow sea in the infrasonic frequency range. Part I. // This collection.
2. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., Zlobin D.V., Kosarev G.V. Acoustics of the shallow sea in scalar – vector description. Theory and experiment. Vladivostok. 2019. 360p.
3. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Akust. zhurn. 2011. V. 57. No. 6. P. 837–843.
4. Svininnikov A.I. Petrophysics of the western frequencies of the Pacific Ocean and the marginal seas of the east of Asia. Vladivostok. Dalnauka. 2004. P. 226–235.

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Коренбаум В.И.*, Горовой С.В., Тагильцев А.А., Бородин А.Е.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail:*v-kor@poi.dvo.ru

Аннотация

Проанализированы проблемы создания приемников градиента давления различных типов для использования в низкочастотном диапазоне, определяемые необходимостью достижения достаточной чувствительности к звуковому давлению в плоской волне, коэффициента деления дипольной характеристики направленности не хуже 26 дБ, динамического диапазона не менее 80–100 дБ. Теоретически оценены пределы применимости ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов по волновым размерам. Разработаны высокоэффективные ПГД инерционного и силового типов. Предложено комбинирование ПГД инерционного/силового и 2-гидрофонного типов в линейной антенне.

Ключевые слова: приемник градиента давления, технические решения, характеристика направленности, частотный диапазон, динамический диапазон.

DEVELOPMENT OF SMALL-SIZE LOW-FREQUENCY PRESSURE GRADIENT SENSORS

Korenbaum V.I. *, Gorovoy S.V., Tagilcev A.A., Borodin A.E.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian
Academy of Sciences*

E-mail:*v-kor@poi.dvo.ru

Abstract

The problems of development of pressure gradient sensors of various types for usage in low-frequency range are analyzed, which are connected to a necessity to provide acceptable sensitivity to sound pressure in a flat wave, minima of the dipole directivity pattern being nor less 26 dB, dynamic range being nor less

80–100 dB. The wavelength limits of acceptability of 2-hydrophone (differential) pressure gradient sensors are theoretically predicted. High effective pressure gradient sensors of inertial and force types are designed. It is suggested to combine a pressure gradient sensor of inertial or force type with the pressure gradient sensor of 2-hydrophone type in linear array.

Key words: pressure gradient sensor, technical solutions, directivity pattern, frequency range, dynamic range.

Введение

Приемники градиента давления (ПГД) сами по себе и в составе комбинированных приемников (КП), содержащих ПГД и приемники звукового давления (ПД), открывают определенные перспективы повышения направленности, помехоустойчивости и обеспечения возможности пассивного пеленгования источника сигнала в антенных системах с малыми волновыми размерами.

Развитие ПГД и КП претерпело несколько этапов. Сейчас отчетливо наблюдается новая волна исследований и разработок, преимущественно связанная с использованием этих приемников на малогабаритных подводных носителях, т.е. там, где развитые антенные системы неприменимы.

Фирмой Wilcoxon Research Inc. (США) анонсировано семейство 4-канальных (трехкомпонентный акселерометр и гидрофон) КП инерционного типа VS-101, VS-206, VS-301, отрывочная информация о которых, включая использование, представлена в некоторых публикациях [4]. Отмечается, что создан новый пьезоэлектрический материал $\text{Pb}(\text{Mb}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbBaTiO}_3$ (известный как PMN-PT кристаллы), с пьезоэлектрическими параметрами, превосходящими обычный цирконат титанат свинца (PZT) в 7–10 раз. Это позволяет значительно уменьшить габариты подводных ПГД и КП. Известна и альтернативная схема ПГД, построенная на адаптированной к подводным условиям воздушной технологии термоанемометрии Microflown Technologies (Arnhem, Netherlands), названная позднее Hydroflown. Заявляется, что эти ПГД обеспечивают частотный диапазон 5–2000 Гц. Встречаются и исследования, связанные с разработкой волоконно-оптических ПГД [4].

Постановка проблемы

Однако далеко не все проблемы разработки малогабаритных ПГД для низкочастотного диапазона решены. Подобные ПГД при малых размерах должны иметь высокую чувствительность к полезному сигналу в виде плоской звуковой волны, глубокие провалы дипольной характеристики направленности, существенно расширенный по сравнению с ПД динамический диапазон.

Целью работы является анализ проблем построения малогабаритных ПГД низкочастотного диапазона и возможных путей их решения.

Основные результаты

По схеме построения известны 4 типа ПГД: 2-гидрофонные, разностные, силовые и инерционные [1, 2, 10].

Казалось бы, наибольшей простотой и доступностью обладают 2-гидрофонная и/или разностная схемы, позволяющие при противофазном (разностном) электрическом включении использовать конструкции стандартных гидроакустических датчиков: для первой в виде пары сферических или двусторонних биморфных гидрофонов, для второй – цилиндрических гидрофонов с разрезанными пополам электродами. Однако обе схемы построения имеют принципиальное ограничение по рабочему диапазону частот, не получившее достаточного освещения. Для иллюстрации этого ограничения рассмотрим амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ПГД этих типов (рис. 1).

АЧХ чувствительности ПГД 2-гидрофонного или разностного типа по звуковому давлению в направлении максимума дипольной направленности (1) имеет наклон 6 дБ/октава в низкочастотную область. Если предположить, что гидрофоны точечные, то максимум чувствительности такого ПГД достигается при расстоянии между гидрофонами $d = \lambda/2$ и равен сумме (за счет вычитания в противофазе) чувствительностей отдельных гидрофонов $v_{p1} + v_{p2}$. Однако в районе $\lambda/2$ обычно имеет место нелинейность АЧХ, поэтому рабочий диапазон устанавливается с примерно вдвое более низкой частоты, т.е. с $\lambda/4$, где чувствительность ПГД составляет примерно $(v_{p1} + v_{p2})/2$. Далее в низкочастотную область чувствительность ПГД спадает строго

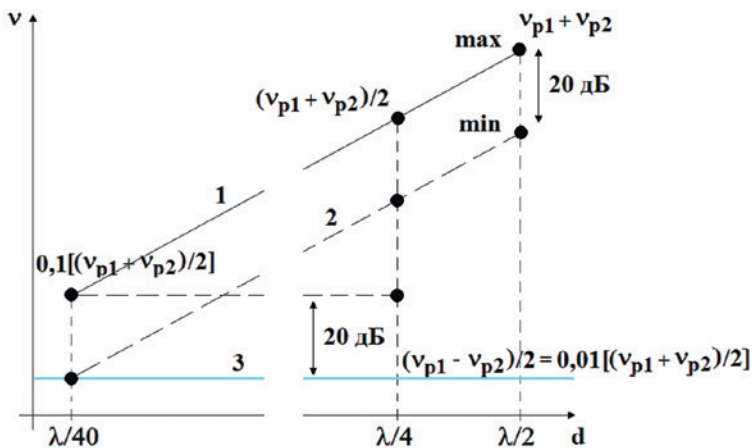


Рис. 1. АЧХ чувствительности ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов по звуковому давлению:
 1 – чувствительность на максимуме (max) дипольной направленности ПГД, 2 – чувствительность на минимуме (min) дипольной направленности ПГД, 3 – остаточная чувствительность за счет разброса отдельных гидрофонов.

линейно и на в 10 раз более низкой частоте, соответствующей $\lambda/40$, составит $0,1(v_{p1} + v_{p2})/2$.

Штриховая линия (2) характеризует чувствительность ПГД по минимуму (провалу) дипольной характеристики направленности, которая должна быть меньше чувствительности на максимуме (1), не менее чем на 20 дБ. Эта чувствительность ПГД по минимуму (2) соответственно падает с понижением рабочей частоты точно так же, как чувствительность по максимуму (1).

Горизонтальная линия (3) характеризует остаточную чувствительность ПГД как «паразитного» ПД, возникающую за счет разброса параметров отдельных гидрофонов $(v_{p1} - v_{p2})/2$, которая, в отличие от графиков (1, 2), не зависит от частоты. В настоящее время выровнять чувствительности двух гидрофонов ПГД вряд ли можно с погрешностью лучше 1% (ограничением здесь выступают не только электроакустические параметры гидрофонов, но и конструктивно-технологическая асимметрия ПГД). Таким образом, остаточная чувствительность ПГД, в лучшем случае составит $0,01(v_{p1} + v_{p2})/2$.

Очевидно (рис. 1), что линии (2) и (3) должны пересечься около значения частоты, характеризуемого длиной волны $\lambda/40$. Это означает, что с обеспечением глубины провалов (коэффициента деления) дипольной характеристики направленности 20 дБ рассматриваемый ПГД работоспособен в диапазоне длин волн между $\lambda/40$ и $\lambda/4$, т.е. в пределах всего одной декады по частоте. При дальнейшем снижении рабочей частоты дипольная направленность ПГД деградирует, что делает его использование невозможным.

Однако даже декада по частотному диапазону обычно недостижима. Из соображений повышения точности пеленгования или улучшения качества формирования кардиоидоподобной направленности глубину провалов дипольной характеристики направленности ПГД стремятся довести до 26 дБ и даже 30 дБ. Очевидно (рис. 1), что при смещении в соответствии с этими значениями коэффициентов деления линия (2) достигнет линии (1) существенно раньше – около $\lambda/20$ и $\lambda/13$ соответственно. Таким образом, реальные ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов могут проектироваться лишь на достаточно узкий, по меркам других типов ПГД, частотный диапазон $d/\lambda = 1/4-1/20$ (1/13), т.е. примерно 1,5–2 октавы. Это и является главным ограничением ПГД 2-гидрофонной и разностной схем. Так, при характерном размере 100 мм, ПГД рассматриваемого типа работоспособен в диапазоне частот 3750 ($d/\lambda = 1/4$) Гц до 750 ($d/\lambda = 1/20$) – 1150 ($d/\lambda = 1/13$) Гц, что для целей шумопеленгования в низкочастотном диапазоне явно недостаточно.

ПГД силового и инерционного типов обладают значительно большей широкополосностью при формировании дипольной характеристики направленности с высоким коэффициентом деления, достигающей 5 декад по частоте [2]. Однако проблемы повышения чувствительности и динамического диапазона остаются актуальными и для этих схем.

Инерционная схема ПГД подразумевает размещение в соколеблющемся вместе с жидкостью в плоской звуковой волне корпусе с «нейтральной» плавучестью датчиков колебательного движения (акселерометров, велосиметров или датчиков колебательного смещения). В настоящее время, исходя из необходимости обеспечения

достаточного динамического диапазона, в качестве датчиков движения преимущественно применяются акселерометры. Как известно, датчики этого типа в ПГД реализуют АЧХ со спадом 6 дБ/октава вниз по частоте, что приводит к компрессии динамического диапазона принимаемых низкочастотных сигналов. Однако и в этом случае ПГД инерционного типа, с одной стороны, должны неискаженно (для дальнейшей обработки) воспринимать гидродинамические и вибрационные помехи, достигающие на частоте 50 Гц ускорения порядка $10^{-3} - 10^{-2} \text{ мс}^{-2}/\text{Гц}^{0.5}$ [3], а с другой стороны – обеспечивать прием слабых шумов моря с пороговым звуковым давлением на частоте 50 Гц порядка $p_0 = 2 \text{ мПа}/\text{Гц}^{0.5}$. В предположении плоской звуковой волны пороговое звуковое давление может быть пересчитано через акустическое сопротивление среды ρc в пороговое колебательное ускорение $a_0 = (p_0/(\rho c))/\omega$, что для частоты $f = \omega/2\pi = 50 \text{ Гц}$ дает $a_0 = 0,425 \cdot 10^{-7} \text{ мс}^{-2}/\text{Гц}^{0.5}$. Таким образом, требуемый динамический диапазон колебательных ускорений, измеряемых ПГД, составит 86–106 дБ. Эта величина ныне является достижимой, однако требует продуманных технических решений. Заметим, что при использовании в качестве датчиков колебательного движения ПГД инерционного типа широкополосных велосиметров, АЧХ которых не имеет компрессирующего спада 6 дБ октава в низкочастотную область, требуемый динамический диапазон, например, для частотного диапазона 1000–10 Гц, увеличится еще на 40 дБ и тем самым станет запредельным для возможностей современной элементной базы.

Что касается чувствительности акселерометров к ускорению, в настоящее время стали доступны ИСР-акселерометры со встроенными повторителями, например, РСВ Piezotronics 393B05, реализующие при массе всего 50 г чувствительность по ускорению $1,0 \text{ В}/\text{мс}^{-2}$ с динамическим диапазоном не менее 80 дБ.

На основе данных акселерометров разработан и изготовлен 3-компонентный ПГД инерционного типа $\varnothing 80 \text{ мм}$ (рис. 2), реализующий чувствительность по звуковому давлению около $500 \text{ мкВ}/\text{Па}$ на частоте 100 Гц [5]. Достигнутые параметры позволяют обеспечить работоспособность этого малогабаритного ПГД в диапазоне частот от 5–10 Гц до 1,5–2 кГц.



Рис. 2. 3-компонентный ПГД инерционного типа с акселерометрами РСВ Piezotronics 393В05 в обтекателе Ø100 мм, предназначенный для горизонтального развертывания

Для ПГД силового типа, в которых градиент давления формируется не за счет разностного электрического включения, а в результате разностного приложения силы давления, существуют аналогичные проблемы. Известные ПГД силового типа [2, 10] содержат пластинчатые изгибные преобразователи, установленные по краям тяжелого сердечника, что делает малым набег звуковой волны между двумя сторонами пластинчатого преобразователя, который собственно и формирует градиент давления. Необходимы конструктивные мероприятия, обеспечивающие увеличения набега волны, вместе с повышением

чувствительности пластинчатых датчиков, при обеспечении малого поперечного размера.

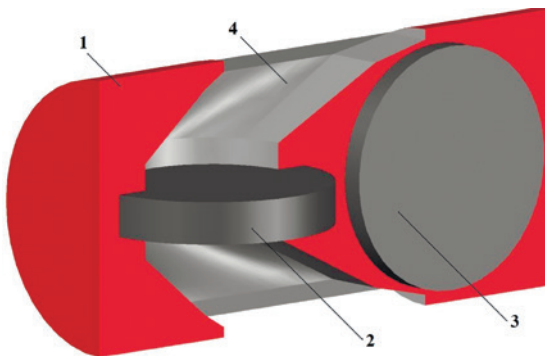


Рис. 3. Изометрия (в разрезе) устройства ПГД силового типа:

1 – цилиндрический корпус из звукоотражающего материала; 2, 3 – круглые чувствительные датчики вертикальной и горизонтальной ориентации соответственно; 4 – вертикальные каналы в корпусе

Для решения этих задач разработана конструкция ПГД (рис. 3), в которой круглые пластинчатые датчики установлены ортогонально, друг за другом, на оси цилиндрического корпуса из звукоотражающего материала и соединены с его поверхностью

полыми каналами, выполненными в теле корпуса, причем сечение каналов плавно меняется от круглого у чувствительного элемента к прямоугольному у поверхности корпуса, без уменьшения поперечной площади сечения, а оси каналов изогнуты во встречном направлении, так что выходы каналов на поверхность цилиндра лежат в ортогональных плоскостях с обеспечением единого фазового центра [8]. Как показано [6], в предложенном решении набег волны, при том же внешнем диаметре, увеличивается, не менее чем в 4 раза, по сравнению с известными ранее конструкциями [2, 10].

В качестве круглых чувствительных элементов могут быть использованы как изгибные пластинчатые биморфные пьезопреобразователи, так и любые другие датчики разности давления, например, электрохимические.

Совместно с ПАО «Дальприбор» изготовлен ПГД предложенного типа (рис. 4) с цилиндрическим корпусом (1) размером 168 x Ø100 мм из нержавеющей стали, состоящий из 8 собираемых на штифтах одинаковых секций [7]. Круглые чувствительные элементы (2) собраны из двусторонних биморфных преобразователей, состоящих из бронзовой подложки Ø70 мм, склеенной с двумя тонкими (толщина 0,3 мм) круглыми пьезодисками Ø30 мм. Бронзовая подложка по контуру Ø65 мм оперта между двумя кольцевыми обоймами,



Рис. 4. Внешний вид ПГД силового типа Ø100 мм

имеющими внешний диаметр $\varnothing 80$ мм. Каждый собранный чувствительный элемент (2) залит звукопрозрачным уретановым компаундом в форме цилиндрической таблетки. На частоте 100 Гц измеренная чувствительность ПГД достигает 130 мкВ/Па (без предусилителя). Экспериментально измеренный коэффициент деления дипольной характеристики направленности ПГД составил не менее 24 дБ в диапазоне частот 100–200 Гц.

Одним из перспективных вариантов является применение ПГД в составе линейных антенн с малым поперечным сечением. Такие антенны создают возможность комбинированного использования ПГД инерционного/силового типов для обеспечения направленности по поперечному габариту и ПГД 2-гидрофонного типа – для обеспечения направленности вдоль продольного размера [9].

Так, при обеспечении разнесения между гидрофонами 400 мм частотный диапазон функционирования ПГД 2-гидрофонного типа может составить от 190 ($d/\lambda = 1/20$) – 290 ($d/\lambda = 1/13$) Гц до 940 ($d/\lambda = 1/4$) Гц, что уже пригодно для некоторых применений. Тогда как поперечный габарит такой антенны может быть уменьшен до 30–40 мм с обеспечением 2-компонентным ПГД инерционного типа, например, на базе акселерометров РСВ333В52 (Piezotronics) [5], сопоставимых чувствительности и коэффициента деления дипольной характеристики направленности с рассмотренным ПГД 2-х гидрофонного типа в этом же диапазоне частот.

Заключение

Проанализированы проблемы разработки ПГД различных типов для использования в низкочастотном диапазоне, определяемые необходимостью достижения: достаточной чувствительности к звуковому давлению в плоской волне, коэффициента деления дипольной характеристики направленности не хуже 26 дБ, динамического диапазона не менее 80–100 дБ. Теоретически оценены пределы применимости ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов, составившие диапазон $1/4$ – $1/20$ длин волны. Создана конструкция 3-компонентного ПГД инерционного типа, при чувствительности около 500 мкВ/Па на частоте 100 Гц, характеризующая динамическим диапазоном не менее 80 дБ. Разработана

конструкция ПГД силового типа, обеспечивающая 4-кратное повышение длины набега волны и соответственно чувствительности по сравнению с известными ранее решениями (схемами). Обоснованы технические предложения по комбинированию ПГД инерционного/силового и ПГД 2-гидрофонного типов в составе линейной антенны.

Благодарность. Исследование поддержано Программой фундаментальных исследований Российской академии наук (№ гос. регистрации проекта АААА-А20-120031890011-8).

Литература

1. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения. М.: Мир. 1974. 360 с.
2. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. С. 23.
3. Коренбаум, В.И. Защита акустических устройств от ближних полей помех: дис. докт. техн. наук: 01.04.06 / В.И. Коренбаум. Владивосток. 1999. 356 с.
4. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. Разработка векторных ГПБА: Состояние вопроса // Тр. 12 Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2014. С. 177–178.
5. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д. Низкочастотные приемники градиента давления инерционного типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 4. С. 142–146.
6. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д., Фершалов Ю.Я., Мариутин В.С. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 5. С. 120–124.
7. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Дегтярев И.В., Серветников М.И. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа // Тр. 7-й всерос. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» Владивосток. 2017. С. 193–196.
8. Патент РФ 2568411 / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Фершалов Ю.Я. Заявл.: 16.10.2014; Опубл.: 16.10.2015. бюл. № 32.
9. Патент РФ 2687301 / Коренбаум В.И. Заявлено: 07.05.2018; Опубликовано: 13.05.2019. бюл. № 14.
10. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПб. Изд-во «Элмор». 1997. 200 с.

References

1. Bobber R. Dz. Gidroakusticheskiyeizmereniya. M.: Mir. 1974. 360 с.
2. Gordiyenko V.A. Vektorno-fazovyemetody v akustike. M.: FIZMATLIT. 2007. P. 23.
3. Korenbaum, V.I. Zashchita akusticheskikh ustroystv ot blizhnikh poley pomekh: dis. dokt. tekhn. nauk: 01.04.06 / V.I. Korenbaum. Vladivostok. 1999. 356 с.

4. Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A. Razrabotka vektornykh GPBA: Sostoyaniye voprosa // Tr. 12 vseros. konf. «Prikladnyye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki». SPB. 2014. P. 177–178.
5. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoi S.V., Kostiv A.E., Shiryayev A.D. Low-frequency inertial-type pressure-gradient receivers for oceanological investigations // Instruments and Experimental Techniques. 2017. V. 60. No. 4. P. 600–604.
6. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoi S.V., Kostiv A.E., Shiryayev A.D., Fershalov Yu.Ya., Maryutin V.S. A Low-frequency power-type pressure-gradient receiver for oceanological investigations // Instruments and Experimental Techniques. 2017. V. 60. No. 4. P. 728–732.
7. Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Gorovoy S.V., Degtyarev I.V., Servetnikov M.I. Nizkochastotnyy priyemnik gradiyenta davleniya silovogo tipa // Tr. 7-y vseros. konf. «Tekhnicheskiye problem osvoyeniya mirovogo okeana» Vladivostok. 2017. P. 193–196.
8. Patent RF 2568411 / Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Gorovoy S.V., Fershalov YU.YA. Zayavl.: 16.10.2014; Opubl.: 16.10.2015. byul. № 32.
9. Patent RF 2687301 / Korenbaum V.I. Zayavleno: 07.05.2018; Opublikovano: 13.05.2019. byul. № 14.
10. Skrebnev G.K. Kombinirovannyye gidroakusticheskiye priyemniki. SPB. Izd-vo «Elmor». 1997. 200 s.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В БУХТЕ ВИТЯЗЬ

Манульчев Д.С.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: manulchevds@gmail.com

Аннотация

Представлены результаты натурных исследований распространения низкочастотного акустического импульсного сигнала в бухте Витязь, Японское море. Измерения были проведены с помощью цифровых радиогидроакустических буев и импульсного пневмоизлучателя, свешиваемого с борта катера. Показано, что на трассе длиной 2,2 км со средней глубиной 30 м формируется сигнал в виде двух импульсов с соизмеримыми амплитудами и с задержкой 0,19 с, что, по-видимому, связано с наличием накопленного в бухте осадочно-го слоя. Данное предположение подтверждается численным моделированием путем введения в модельный волновод песочно-илистой подложки как канала распространения энергии импульсного сигнала.

Ключевые слова: сейсмоакустический импульс, распространение энергии звука, неоднородный геоакустический волновод.

ENERGY PROPAGATION OF THE LOW-FREQUENCY PULSE ENERGY IN VITYAZ BAY

Manul'chev D.S.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: manulchevds@gmail.com

Abstract

The paper presents the results of field studies on the propagation of a low-frequency acoustic pulse signal in Vityaz Bay, Japanese Sea. The measurements were carried out using digital radio-acoustic buoys and a pulsed air emitter hanging from the side of the boat. It was shown that on a 2.2 km long path with an average depth of 30 m, a signal is formed in the form of two pulses with comparable amplitudes and with a delay of 0.19 s, which is apparently due to the presence of a sedimentary layer accumulated in the bay. This assumption is confirmed

by numerical simulation by introducing into the model waveguide a sandy-silty substrate as a pulse energy signal propagation channel.

Keywords: seismoacoustic pulse, sound energy propagation, inhomogeneous geoaoustic waveguide.

Введение

Практическая деятельность людей на шельфе часто сопровождается шумовым загрязнением моря. Причиной тому могут служить взрывы от сейсмопушек при сейсморазведке месторождений нефти и газа, установки газонефтедобывающих платформ и их обслуживания, а также строительные работы, сопровождаемые, например, забивкой фундаментных свай на берегу. Подобное антропогенное акустическое воздействие может отпугивать морских животных от привычных для них мест обитания, кормежки и отдыха. Таким образом, освоение шельфа обосновывает актуальность изучения распространения низкочастотных акустических колебаний в море и на берегу.

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных в мае 2013 г. на шельфе Японского моря в районе полуострова Гамова в относительно глубоководной бухте Витязь. Сложный рельеф дна, а также накапливаемый осадочный слой, который формируется преимущественно за счет выпадающих в бухту ручьев и дождевых стоков, могут оказывать влияние на распространение энергии низкочастотных сейсмоакустических сигналов. Целью работы является экспериментальное и модельное изучение влияний неоднородностей геоакустического волновода, характерного для шельфа, на формирование низкочастотного акустического поля.

Бухта Витязь окружена пологими берегами с песчаными и гравийными пляжами. На выходе из бухты располагаются три небольших скалистых острова Таранцева. На рис. 1 приведена карта района с указанием точки постановки донной станции – R, а также точек излучения низкочастотного импульсного сигнала р.1 – р.6. Акустическая трасса ориентирована вдоль бухты в сторону ее выхода. Расстояние от самой удаленной точки излучения до точки R достигало 2,3 км. Глубина моря в точке приема R составляла 36 м.

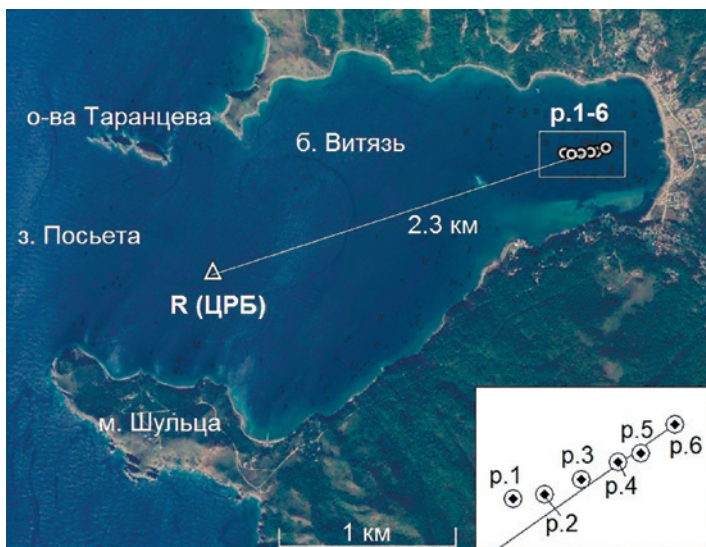


Рис. 1. Карта района б. Витязь (залив Посьета, Японское море) с указанием точки приема R и точек излучения р.1–р.6

Измерительно-регистрационный комплекс

В рассматриваемом эксперименте стационарные измерения вариаций акустического давления у дна проводились в частотном диапазоне 2–2000 Гц с помощью гидрофона типа ГИ-50 и цифрового радиобуя – ЦРБ [2]. Акустический низкочастотный импульсный сигнал генерировался пневмоизлучателем [4], свешиваемым с борта дрейфующего катера. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ, опускаемого с борта катера на глубины 3–10 м на удалении ≈ 18 м от пневмоизлучателя. Цифровые радиотелеметрические каналы от ЦРБ, установленного в море, и опорного ЦРБ, расположенного на излучающем катере, принимались на береговом посту и синхронно вводились в ЭВМ с помощью АЦП.

Результаты натуральных измерений

Излучение низкочастотных акустических импульсов производилось последовательно из точек р.1 – р.6. Амплитуда опорного сигнала

(18 м от излучателя) достигала значения 400 Па с длительностью импульса 0,2 с. Временная развертка принятых в точке R акустических сигналов показана на рис. 2. Видно, что принятый сигнал состоит из двух разделенных импульсов с примерно равными амплитудами, не превышающих 10 Па. На некоторых записях после второго импульса наблюдаются затяжные «хвосты». Отметим, что акустические импульсы генерировались на разных горизонтах (3, 5, 6, 8 и 10 м), поэтому формируемая пневмоизлучателем акустическая мощность была разной. Согласно [1], отношение акустических мощностей при наличии поверхности воды и в безграничном пространстве для частоты звука 60 Гц ($\lambda = 24$ м) при расположении источника на горизонте 3 м составляет $\frac{W}{W_0}(z_s = 3\text{ м}) = 0.36$, на горизонтах 5 м и 10 м соответственно $\frac{W}{W_0}(z_s = 5\text{ м}) = 0.8$ и $\frac{W}{W_0}(z_s = 10\text{ м}) = 1.17$. При расположении источника на глубинах 8 м в точке p.3 и 10 м в точке p.6 происходила максимальная отдача энергии сжатого воздуха пневмоизлучателя в воду, и как следствие в точку R приходили импульсы с наибольшей амплитудой. Наименьшую амплитуду имел сигнал, сгенерированный

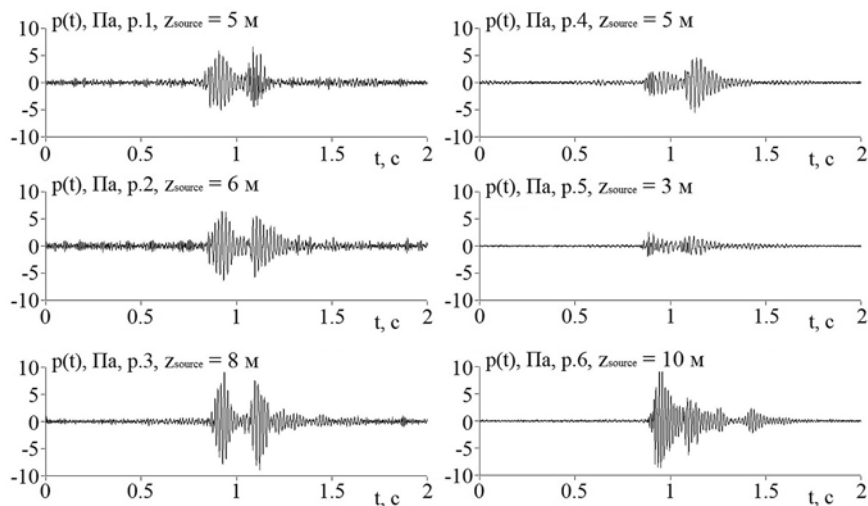


Рис. 2. Принятые в точке R импульсные сигналы при их излучении на различных горизонтах в точках p.1–p.6

на горизонте 3 м в точке р.5. Таким образом, амплитуда принятых сигналов меняется за счет глубины положения пневмоизлучателя, а не за счет пространственного перемещения точки излучения.

Наибольший интерес представляет природа разделения импульсов в принятых сигналах. На рис. 3 показаны опорный импульс на удалении около 18 м от источника и сигнал, принятый в точке р.1, а также их спектры. Спектральный анализ двойного импульса (на рис. 3 импульс разделен на две реализации 1. и 2.) показал, что уровни спектральной плотности мощности импульсов отличаются незначительно. Согласно графику $G(f)$ (рис. 3б) основная энергия генерируемого сигнала приходится на частотный диапазон 40–70 Гц. В опорном импульсе наблюдается также энергия на частотах 80–200 Гц, которая, однако, с потерями 30–40 дБ распространяется до точки R. С наименьшими потерями распространяется энергия в диапазоне частот 50–54 Гц.

Для определения временной задержки между двумя импульсами по методике, представленной в работе [3], была рассчитана функция взаимной корреляции опорного сигнала и сигнала, принятого в точке приема. На рис. 3 представлен график модуля взаимной корреляционной функции и ее огибающей. Также отмечены пики

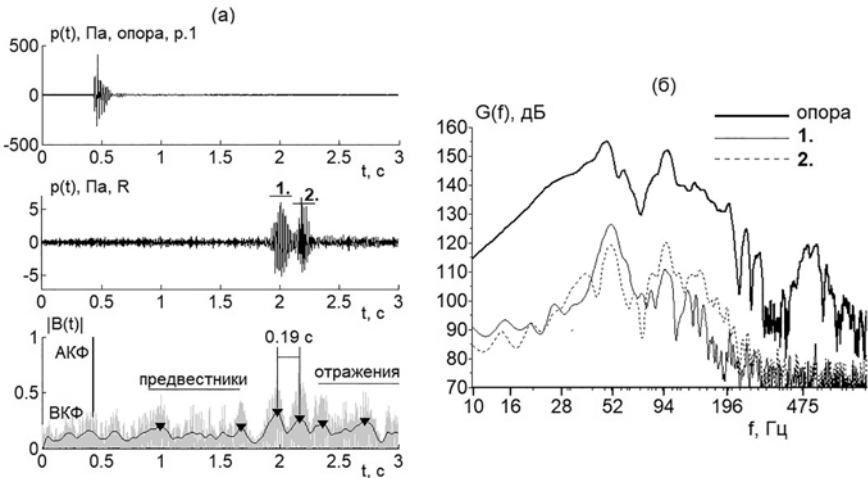


Рис. 3. Опорный сигнал и сигнал, полученный в точке приемника R при излучении из точки р.1: а) – значения модуля нормированной взаимной корреляционной функции $B(t)$; б) – спектры акустических сигналов, соответствующие временным интервалам 1 и 2

функции, соответствующие порогу срабатывания «сходства» опорного импульса с принятым сигналом. Из графика корреляционной функции видно, что часть акустической энергии распространяется с высокими скоростями в скальных породах, слагающих дно, и с большими потерями приходит в точку R (предвестники). Затем гидрофон регистрирует два разделенных импульса, одним из которых является «прямой» импульс, энергия которого переносится водной модой (модами). Разность времени прихода первого и второго импульса составила 0,19 с. Если принять, что скорость звука в воде равна 1440 м/с, то путь распространения второго импульса должен быть больше первого на 273 м.

Объяснить наличие двух импульсов, основываясь на отражении излученного сигнала от берегов бухты Витязь, сложно. Как было сказано выше, бухту Витязь окружают преимущественно пологие берега с песочными и галечными пляжами. Низкочастотный звук, распространяясь в сторону берега, вследствие уменьшения глубины будет затухать, поэтому любые отражения должны приводить к резким уменьшениям амплитуды отраженного импульсного сигнала, что противоречит наблюдениям. В работе [3] было показано, что при распространении акустического импульса вдоль скалистого берега звук эффективно отражается на частотах до 100 Гц. Отражение звука от островов Таранцева также не объясняет разделение импульсов, поскольку в этом случае временная задержка между приходами импульсов должна быть существенно большей. По всей видимости, приход в точку приема разделенных импульсов связан не с отражением от какой-либо части берега, а с особенностями стратификации геоакустического волновода. Наличие между водой и скальными породами подложки из осадочного материала (ил, песок) может сформировать дополнительный канал распространения энергии акустических колебаний, толщина которого будет соизмерима с толщиной водного слоя. Таким образом, на малых глубинах низкочастотный звук может захватываться водным слоем и в то же время слоем осадков, отражаясь от акустического фундамента (преимущественно гранита) и границей раздела «вода – дно». Проверим данную гипотезу с помощью численного моделирования.

Результаты численного моделирования

Представленные ниже теоретические расчеты основываются на приближении модового параболического уравнения (МПУ), полученного с помощью метода многомасштабных разложений для слоистой среды с произвольным количеством слоев [5]. Модельные расчеты проводятся в неоднородном 3D-геоакустическом волноводе, в котором, как правило, известен пространственный профиль дна и распределение скорости звука в водном слое. Акустическое поле рассчитывается в вертикальной плоскости с помощью распространяющихся взаимодействующих вертикальных нормальных мод, а в горизонтальной плоскости в секторе, определяемом узкоугольным параболическим уравнением.

Пусть модельный геоакустический волновод представляет собой трехслойную среду (вода – осадочный слой – дно) с профилем дна, близким к реальной батиметрии (рис. 4). Толщина осадочной подложки уменьшается при удалении от берега. Свойства дна задаются линейным распределением физико-акустических параметров донных пород – скорость звука продольной волны, плотность грунта и коэффициент затухания. Источник звука располагается на горизонте 8 м. Прием акустических колебаний осуществляется в точке R, расположенной вблизи дна на горизонте 36 м и на удалении 2,2 км от источника. Упругие свойства пород дна при расчетах не учитываются. Расчеты проводятся в адиабатическом приближении. Функция источника строилась путем умножения опорного сигнала на коэффициент, равный 3.5. Длительность модельного сигнала составляет 1 с.

Построение первых трехмодовых функций на частоте звука 50 Гц показало, что первая мода

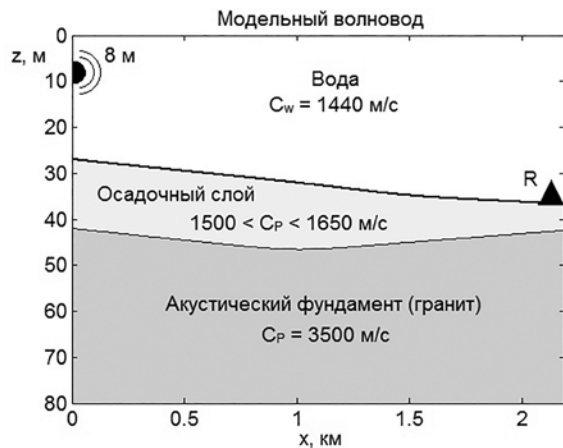


Рис. 4. Стратификация модельного геоакустического волновода

является водной. Вторая мода переносит часть энергии акустических колебаний в воде, но большая часть энергии фокусируется в осадочном слое. Третья мода является донной и уносит часть энергии в третий слой (гранит). Звук на более низких частотах реагирует благодаря наличию градиента в нижнем слое и возвращается в воду в виде низкочастотных «предвестников». Первые две распространяющиеся моды приведены на рис. 5а.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 5–6. На рис. 5б видно, что модельный импульсный сигнал, рассчитанный в приближении двух мод, имеет форму, похожую на форму экспериментального сигнала. Запаздывание второго импульса от первого в модельном сигнале составляет 0,2 с (согласно экспериментальным данным – 0,19 с). Если в расчетах учитывать только первую моду, то второй импульс, распространяющийся в слое осадков, пропадает, а амплитуда первого импульса уменьшается. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что вторая мода вносит вклад в энергию первого водного импульса и полностью формирует запаздывающий импульс,

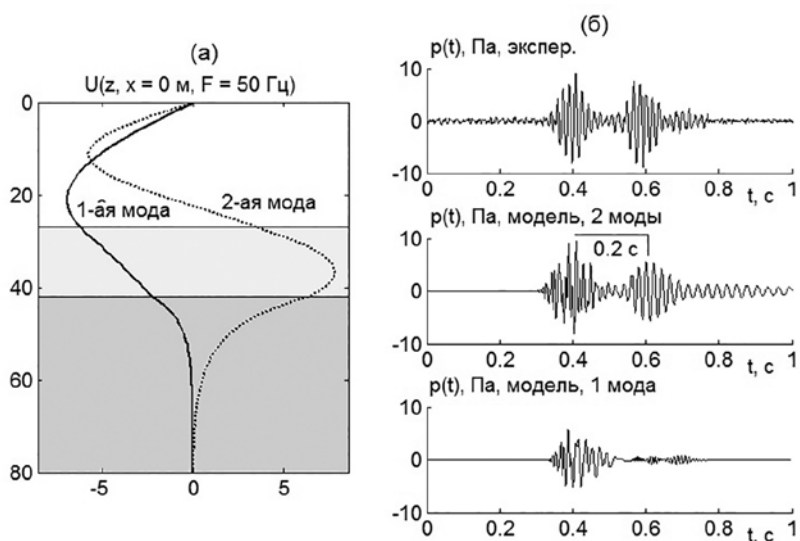


Рис. 5. а) первые две модовые функции на частоте звука 50 Гц в точке источника; б) экспериментальный и соответствующие ему модельные импульсные сигналы во временной области в приближении двух и одной мод

распространяющийся с групповой скоростью меньшей, чем водный импульс. На рис. 6 приведен график пространственного распределения величины SEL (уровень акустической экспозиции) модельного импульса, на котором наблюдается фокусировка энергии акустического колебания в водном слое и в слое осадков.

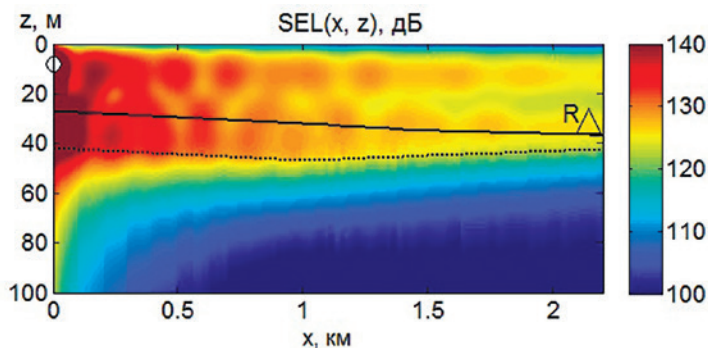


Рис. 6. Пространственное распределение параметра SEL модельного импульсного сигнала

Заключение

Согласно натурным данным при распространении низкочастотного акустического импульсного сигнала вдоль бухты Витязь в сторону моря гидрофоном у дна регистрировался «двойной» импульс с задержкой 0,19 с, оба импульса имели соизмеримые амплитуды и графики спектра. Была выдвинута гипотеза о том, что наличие одного из импульсов объясняется особенностями стратификации волновода, характерного для данной местности. Слой осадочных пород, имеющих толщину, соизмеримую с толщиной водного слоя (рис. 4), создает дополнительный канал распространения звука. Звук здесь фокусируется между дном и слоем горных пород, представленных преимущественно гранитом. Как показали модельные расчеты, энергия «прямого» (или водного) импульса переносится первой и частично второй модой, в то время как другой импульс распространяется в слое осадков за счет преимущественно второй моды. Поскольку групповая скорость первой моды на частотах 50–54 Гц больше скорости второй моды, то первым регистрируется водный импульс. Изменение толщины

осадочного слоя, а также его физико-акустических параметров позволяет регулировать время задержки между импульсами, а также отношение их амплитуд. Опираясь на экспериментальные данные, можно проводить более точную томографию дна в мелководных бухтах.

Благодарность. Автор выражает благодарность Рутенко А.Н., Борисову С.В., Ковзелью Д.Г., Гриценко В.А. за участие в натуральных экспериментах.

Литература

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана // Ленинград. Гидрометеиздат. 1982. С. 77–80.
2. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н. Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 102–106.
3. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 384–394.
4. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU2447658 С2. Российская Федерация / Гореликов А.И. 2010126403/13; заявлено 28.06.2010; опубликовано 20.04.2012.
5. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion. 2015. V. 58. P. 42–52.

References

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical Foundations of Ocean Acoustics // Leningrad, Gidrometeoizdat. 1982. P. 77–80.
2. Kovzel D.G., Rutenko A.N. Autonomous acoustic station with digital radio telemetry channel for monitoring seismic-acoustic signals on the shelf // Instruments and experimental technique. 2009. No.6. P. 102–106.
3. Rutenko A.N., Manulchev D.S. Propagation of low-frequency waves through Cape Schulz // Acoust. Phys. 2014. V. 60. No. 4. P. 384–394.
4. Ecological generator of scaring sounds. Pat. RU2447658 C2. Russian Federation / Gorelikov A.I. 2010126403/13; claimed June 28, 2010; published on April 20, 2012.
5. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion. 2015. V. 58. P. 42–52.

АВТНОМНАЯ НИЗКОЧАСТОТНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СТАНЦИЯ

Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Самченко А.Н., Швырев А.Н.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

Аннотация

Разработана и изготовлена автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем, развивающая акустическое давление до 2400 Па (188 дБ), приведенное к расстоянию 1 метра от оси излучателя, в диапазоне частот 420–520 Гц (по уровню –3 дБ) и глубиной погружения до 500 м. Примененные технические решения позволяют использовать станцию для широкого круга океанологических исследований, а также при построении систем навигации подводных аппаратов и передачи данных по гидроакустическому каналу.

Ключевые слова: гидроакустическая станция, фазоманипулированные сигналы, частотный диапазон.

AN AUTONOMOUS LOW-FREQUENCY BROADBAND HYDROACOUSTIC EMITTING STATION

Pivovarov A.A., Yaroshchuk Y.O., Samchenko A.N., Shvyrev A.N.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,

Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

Abstract

An autonomous low-frequency broadband hydroacoustic emitting station with electromagnetic transducer has been developed and manufactured, for developing acoustic pressure up to 2400 Pa (188 dB) measured a distance of 1 meter from the axis of the emitter in the frequency range 420–520 Hz (at –3 dB level) and immersion depth up to 500 m. The applied technical solutions allow to use the station for a wide range of oceanographic studies, as well as when construction of navigation systems for underwater vehicles and data transmission on the hydroacoustic channel.

Keywords: hydroacoustic station, phase-shift keyed signals, frequency range.

Введение

При отработке методов и техники решения задач акустической томографии в океане и шельфовой зоне активно применяется зондирование водной среды с помощью широкополосных когерентных (частотно-модулированных, фазоманипулированных) гидроакустических сигналов на стационарных исследовательских трассах. Наиболее удобным и практичным для излучения различных типов сигналов является применение автономных донных гидроакустических излучающих станций. Постановка излучателя на якорь или на дно дает возможность стабилизировать измерительные трассы распространения сигнала, а автономность излучателя позволяет производить работы в произвольной акватории, не привязываясь к береговой инфраструктуре.

Для проведения натуральных экспериментов по решению исследовательских задач в области океанологии и акустической томографии сотрудниками лаборатории «Статистического моделирования» Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва была сконструирована и изготовлена автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция.

В данной статье рассматриваются конструктивные решения и применение автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической станции с электромагнитным преобразователем, создающей акустическое давление до 2400 Па в диапазоне частот 420–520 Гц [1]. Испытания станции проведены на шельфе Японского моря в октябре 2017 года. На рис. 1 показан внешний вид станции на контрольном испытании.

Постановка проблемы

Основными требованиями к станции являлись: минимизация массогабаритных характеристик (общий вес не более 100 кг), автономность не менее 3 суток, рабочий частотный диапазон 420–520 Гц, акустическое давление в рабочем диапазоне, приведенное к 1 метру, не менее 2000 Па, возможность синхронизации с другими устройствами и наличие приемного гидрофона для записи акустических сигналов. Дополнительной опцией является возможность использовать автоном-

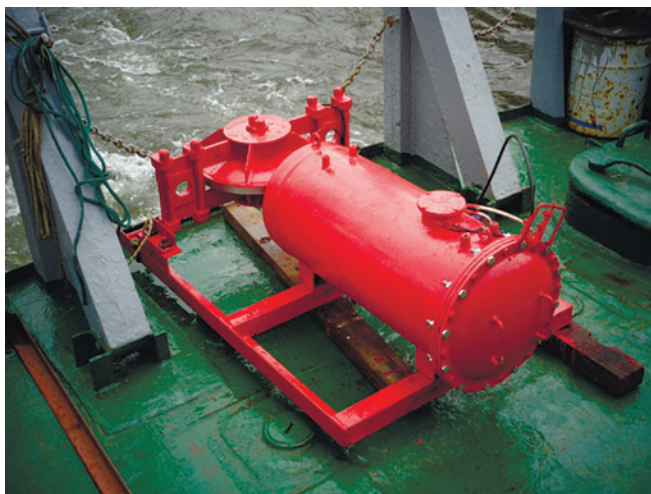


Рис. 1. Внешний вид автономной широкополосной низкочастотной гидроакустической станции

ную излучающую станцию в качестве ретранслятора гидроакустических сигналов и маяка для позиционирования подводных аппаратов. В качестве электроакустического преобразователя, исходя из требований к срокам автономности, массогабаритным характеристикам и излучаемой акустической мощности станции, был выбран преобразователь электромагнитного типа. Электромагнитные преобразователи в данном частотном диапазоне обладают рядом преимуществ: они просты в изготовлении и обслуживании, обладают наиболее высокими удельной мощностью и электроакустическим КПД по сравнению с пьезоэлектрическими и электродинамическими преобразователями [2]. Кроме того, для задач подводного позиционирования и ретрансляции гидроакустических сигналов, а также обработки и интерпретации, полученных в океанологических исследованиях, натуральных данных, существует необходимость в наличии канала синхронизации с различными устройствами и регистрации гидроакустических сигналов.

Технические решения

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция состоит из следующих элементов: стального герметичного

контейнера и электромагнитного гидроакустического преобразователя, закрепленных на металлической раме через виброизолирующие демпферные крепежные элементы. На контейнере расположен компенсатор гидростатического давления в акустически жестком корпусе и приемный гидрофон. Во внутренней полости герметичного контейнера находятся аккумуляторная батарея, термостатированный высокостабильный кварцевый генератор тактовой частоты, микроконтроллерный блок управления, соединенный последовательным синхронным интерфейсом блоком энергонезависимой твердотельной SD-памяти, подключенный к блоку управления канал регистрации гидроакустического поля в составе гидрофона, масштабирующего усилителя и аналого-цифрового преобразователя, а также подключенный к выходу микроконтроллерного блока управления усилитель мощности, соединенный с электромагнитным гидроакустическим преобразователем.

На рис. 2 приведена функциональная схема автономной широкополосной гидроакустической станции.

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция работает следующим образом. Во время подготовки излучающей станции к работе накачивается воздухом компенсатор

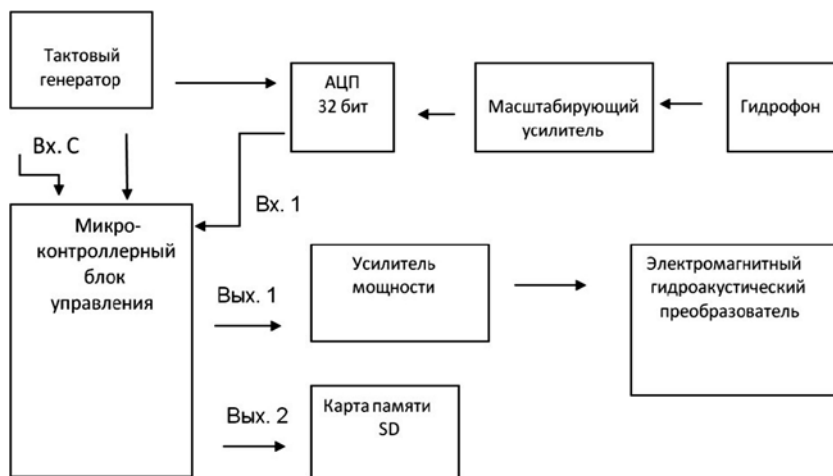


Рис. 2. Функциональная схема автономной широкополосной гидроакустической станции

гидростатического давления для электромагнитного преобразователя и устанавливается аккумуляторная батарея питания. При включении питания усилитель мощности переходит в режим ожидания сигнала с микроконтроллерного блока управления. Микроконтроллерный блок управления, изготовленный на базе микроконтроллера PIC32MM0064GPL036, коммутирует вход 1 (Вх. 1) приемного тракта опорного гидрофона и переходит в режим ожидания внешнего синхросигнала запуска работы системы, подаваемого на вход С (Вх. С). Это может быть сигнал с устройства точного времени (Глонасс, GPS), и в дальнейшем синхронизация поддерживается с помощью высокостабильного тактового генератора.

Тактовая частота для микроконтроллерного блока управления и АЦП приемного гидрофона подается с высокостабильного термостатированного тактового генератора МХО37/8Р. При поступлении на вход С микроконтроллерного блока управления внешнего сигнала запускается программа формирования и передачи на усилитель мощности излучаемого сигнала, а также преобразования и записи гидроакустического сигнала, поступающего на вход 1. Сигнал с гидрофона ЭПБА 3 проходит через масштабирующий усилитель с фильтром низкой частоты и поступает на 32-битное АЦП, а далее по SPI протоколу на цифровой вход 1 (Вх. 1) микроконтроллерного блока управления. Данные накапливаются в буфере памяти блока управления и затем блоками выдаются на цифровой выход 2 (Вых. 2) для записи на энергонезависимую карту памяти типа SD емкостью 128 Гбайт, что позволяет обеспечить непрерывность записи на срок до трех месяцев. Сигнал, формируемый по заданной программе, с микроконтроллерного блока управления подается через аналоговый выход 1 (Вых. 1) на усилитель мощности и далее на электромагнитный гидроакустический преобразователь, и происходит излучение гидроакустического сигнала в водную среду. Формирование типов и продолжительности сигналов определяется программой и выбирается из условий и задач применения излучающей станции.

Использование фазоманипулированного, частотно-модулированного зондирующего сигнала и наличие синхронизации с другими устройствами позволяет расширить область применения автономной

низкочастотной широкополосной гидроакустической излучающей станции в направлении построения системы передачи данных по гидроакустическому каналу и позиционирования для подводных аппаратов в произвольной акватории, а также расширения возможностей в области акустической томографии водной среды.

В режиме подводного маяка для позиционирования подводных аппаратов несколько автономных низкочастотных широкополосных гидроакустических излучающих станций устанавливаются на дно в районе использования подводных аппаратов и периодически излучают фазоманипулированные сигналы на различных несущих частотах в границах рабочего диапазона. На подводных аппаратах устанавливается приемный гидрофон и специальный блок обработки данных. В памяти блока находятся точные координаты постановки автономных излучателей и опорные сигналы соответствующих им частот, а также точное синхронизированное время их излучения. Затем в блоке обработки производится операция свертки полученного с приемного гидрофона сигнала с опорными сигналами, в результате которой получаются времена прохождения сигнала от маяков до подводного аппарата и, зная среднюю скорость звука в данной акватории, методом триангуляции определяется текущее положение аппарата.

Благодаря использованию микроконтроллерного блока управления и наличию канала приемного гидрофона с помощью соответствующей модификации управляющей программы также существует возможность передачи телеметрической информации и ретрансляции сигналов других станций с целью построения распределенной информационной системы для выбранной акватории. И хотя гидроакустический канал в пределах частотного диапазона станций обладает сравнительно низкой пропускной способностью, но для широкого класса задач по передаче команд и данных телеметрии этого оказывается достаточно.

Заключение

При проектировании излучающей станции были найдены разумные компромиссы между такими определяющими параметрами, как

срок автономности, массогабаритные характеристики и излучаемая мощность. Предлагаемые технические решения за счет установки электромагнитного гидроакустического преобразователя позволяют производить излучение гармонических, частотно-модулированных, фазоманипулированных сигналов с высоким качеством и КПД. Кроме того, включение в состав оборудования излучающей станции высокоточного тактового генератора, канала синхронизации с другими устройствами и канала записи с гидрофона расширяет перечень используемых методик для задач акустической томографии, дает возможность использования станции в качестве подводных маяков для позиционирования подводных аппаратов, а также передачи ретрансляции данных по гидроакустическому каналу.

Работа выполнена по госзаданию номер: АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Литература

1. Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция. Патент 176198 ПМ № 2017133585 от 12.01.2018 г. Бюл. № 2.
2. Долгих Г.И., Чупин В.А., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярошук И.О. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19–26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137. DOI: 10.7868/S0032816217030181.

References

1. Pivovarov A.A., Yaroshchuk I.O., Shvyrev A.N., Samchenko A.N. An autonomous low-frequency broadband hydroacoustic emitting station // Patent 176198 ПМ № 2017133585 12.01.2018. Бюл. № 2.
2. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Chupin V.A., Yakovenko S.V., Yaroshchuk I.O. A hydroacoustic system that radiates at frequencies of 19–26 Hz // Instruments and Experimental Techniques. 2017. Vol. 60. Iss. 4. P. 596. DOI: 10.1134/S0020441217030186.

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ РАКОМ-ЩЕЛКУНОМ В б. ВИТЯЗЬ

Рутенко А.Н.*, Ущиповский В.Г., Радаев И.Р.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: *rutenko@poi.dvo.ru

Аннотация

Приводятся результаты натурных и модельных исследований распространения импульсных высокочастотных акустических сигналов, генерируемых раком-щелкуном на шельфе Японского моря в бухте Витязь. Пространственные акустические измерения проводились с помощью 4-х гидрофонов, устанавливаемых в море глубиной 3 м с помощью металлической конструкции – рама высотой 3 м. Модельные исследования, проведенные с помощью лучевой теории, показали, что из-за интерференции прямого акустического сигнала, распространяющегося в водном слое, и сигнала, отраженного от поверхности дна, рак-щелкун эквивалентен не точечному источнику, а диполу, и поэтому в водном слое на расстоянии 6 м от рака формируется вертикальная интерференционная картина, подобная экспериментальной с минимальной энергией у дна. В акустическом поле, формируемом импульсом, отраженным от поверхности моря, из-за запаздывания подобной интерференции нет. Показано, что рак-щелкун в качестве коммуникационного сигнала применяет тройки акустических импульсов, следующих с периодом 0,45 с.

Ключевые слова: акустический импульс рака-щелкуна, распространение высокочастотного акустического импульса в прибрежной зоне.

ACOUSTIC SIGNALS GENERATED BY SNAPPING SHRIMP IN VITYAZ BAY

Rutenko A.N.*, Ushchipovskii V.G., Radaev I.R.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences*

E-mail: *rutenko@poi.dvo.ru

Abstract

Here are the results of real and model studies of the propagation of pulsed high-frequency acoustic signals generated by the snapping shrimp on the shelf of the Sea of Japan in the Vityaz Bay. Spatial acoustic measurements were carried out

using 4 hydrophones installed in the sea 3 m deep using a metal structure – a 3 m long frame. Model researches carried out using the radiation theory showed that due to the interference of the direct acoustic signal propagating in the water layer and the signal reflected from the bottom surface, the snapping shrimp is equivalent not to a point source, but to a dipole, and therefore in the water layer at a distance of 6 m from the shrimp, a vertical interference pattern is formed similar to the experimental one with minimal energy at the bottom. In an acoustic field formed by a pulse reflected from the sea surface due to the delay, there is no such interference. It has been shown that the snapping shrimp uses three acoustic pulses of the next with a period of 0.45 s as a communication signal.

Keywords: acoustic impulse of a snapping shrimp, propagation of a high-frequency acoustic impulse in the coastal zone.

Введение

Семейство раков-щелкунов (Decapoda: Alpheidae), включающее более 600 видов, относится к отряду ракообразных [6, 7]. Большинство видов раков-щелкунов обитает в тропических и субтропических морях на мелководье, однако некоторые виды живут в прохладных водах. В работах [2, 3] представлен анализ акустических сигналов рака-щелкуна, измеренных в Черном море на шельфе Абхазии. Характерной особенностью раков-щелкунов является малоподвижный образ жизни и довольно редкие перемещения, но главной особенностью данного семейства является способность к ультрабыстрому закрытию аномально большой клешни, в результате чего происходит формирование кавитационной высокоскоростной струи воды, которая используется для охоты, обороны, выкапывания норки и коммуникации [11]. Практически мгновенное закрытие большой клешни вызывает образование мощного щелчка, который сопровождается формированием кавитационного пузыря и испусканием света [10]. За счет замедления границы пузырька при его разрушении происходит локализованное увеличение температур до 5000 К, что является эффективным способом генерации ударных волн, способных повредить даже минеральные скелеты других организмов [1]. Визуализация момента смыкания клешни свидетельствует о формировании вихревых структур вблизи клешни, имеющих радиус ядра порядка 4 мм и перепад давления в ядре порядка 200 Па.

В 2017 г. в бухте Витязь Японского моря у берега м. Шульца были измерены редкие высокочастотные 200–24000 Гц акустические импульсы, в которых амплитуда вариаций акустического давления $p(t)$ (см. рис. 1) превысила 3000 Па. Расстояние от гидрофона до рака с учетом разности прихода прямого и отраженного от поверхности моря импульсов примерно равно 0,7 м. Согласно работам Виноградова Л.Г. [6], источником таких сигналов мог быть рак-щелкун (Alpheidae), обитающий (проживающий) в Японском море. На рис. 1а видно, что амплитуда положительной полуволны в измеренном акустическом импульсе достигла примерно 3,2 кПа, это эквивалентно значению уровня 190,1 дБ отн. 1 мкПа. На этом рисунке во временной области мы видим прямой импульсный сигнал (интервал 1) и сдвинутый по фазе на 180° сигнал, пришедший в точку приема после отражения от поверхности моря (интервал 2). Толщина водного слоя $H = 3$ м.

В данной работе приводятся результаты специальных пространственных акустических измерений, проведенных с помощью металлической конструкции, показанной на рис. 2, позволившей установить в море глубиной 3 м четыре однотипных гидрофона в виде вертикальной эквидистантной антенны с апертурой, равной 240 см.

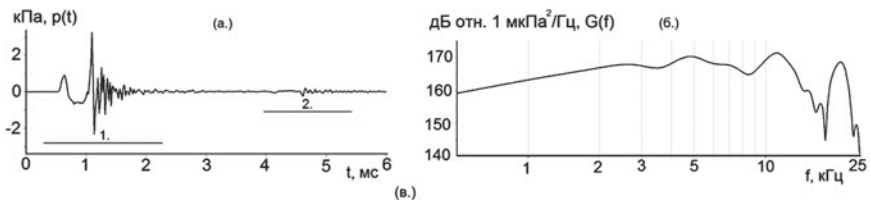


Рис. 1. Акустические импульсы, излученные раком-щелкуном: а) прямой (интервал 1) и отраженный от поверхности моря (интервал 2); б) спектр «прямого» сигнала; в) фотография рака-щелкуна Alpheidae [6]

Измерительно-регистрационный комплекс

Синхронные пространственные (p_0, \dots, p_3) измерения акустического поля, формируемого импульсным сигналом рака-щелкуна, проводились с помощью металлической конструкции, показанной на рис. 2. Четыре цифровых гидрофона типа ГИ-50 [8] и измерительно-

регистрационный комплекс обеспечили синхронные измерения вариаций акустического давления – $p(t)$ в частотном диапазоне 2–24000 Гц. Синхронность проведения акустических измерений и соответствующие преобразования аналогового напряжения в 24-разрядный цифровой код обеспечило 4-канальное АЦП NI 9239 компании National Instruments (NI), работающее с частотой дискретизации равной 48 кГц. Этот код через крейт DAQ 9184 (NI) вводился в ЭВМ с помощью программы DAQEnterSP. Программа

DrawData (автор В.А. Гриценко) обеспечила синхронную визуализацию измеренных с помощью гидрофонов акустических сигналов, их архивирование, автоматический поиск импульсных сигналов и расчет оценок их параметров и спектров. Регистрация, поиск и анализ параметров импульсов проводились в лабораторном помещении, расположенном на берегу.

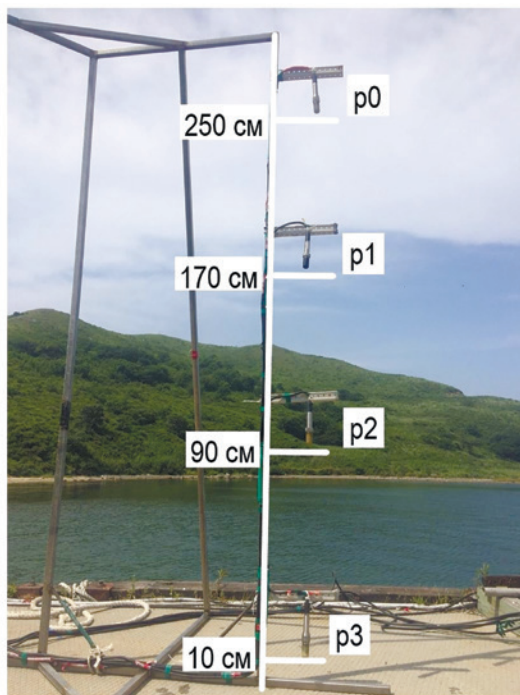


Рис. 2. Металлическая конструкция для проведения акустических измерений в вертикальной плоскости с помощью 4-х гидрофонов

Результаты натуральных измерений

Клешню рака-щелкуна можно представить «точечным» излучателем сферических волн, но из-за близости дна получается вертикальный диполь, и поэтому, согласно работе [5], акустический импульс, формируемый раком-щелкуном, имеет диаграмму направленности. Представленные ниже графики иллюстрируют ее проявление. Согласно рис. 3а за максимальные амплитуды вариаций $p(t)$, соответствующие прямому и отраженному от поверхности моря импульсам, измерены гидрофоном p_1 на расстоянии 170 см от дна.

Отметим, что амплитуда прямого сигнала может быть меньше амплитуды сигнала, отраженного от поверхности моря, и это особенно хорошо видно в сигнале, измеренном у дна гидрофоном p_3 . На рис. 3б показана геометрическая схема, позволяющая по относительным временным задержкам, представленным на рис. 3а, определить радиус r окружности с вертикальной антенной в центре, на котором находился рак, излучивший акустический импульс, показанный на

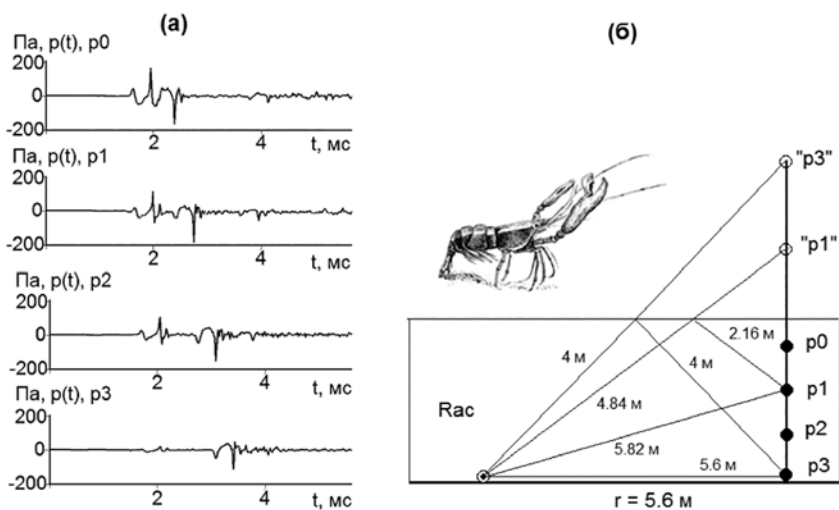


Рис. 3. а) прямые и отраженные от морской поверхности акустические импульсы рака-щелкуна, измеренные вертикальной цепочкой из 4-х гидрофонов (см. рис. 2); б) геометрическая схема для оценки радиуса r , на котором мог находиться рак-щелкун, излучивший акустический импульс, показанный на рис. 3а

рис. 3а. Расчеты выполнены для однородного водного слоя толщиной 3 м и значением скорости звука в воде C_w , равным 1450 м/с. На рис. 3а видно, что в 3-метровом водном слое к вертикальной измерительной цепочке подошел водный импульс с практически вертикальным фронтом, причем его амплитуда минимальна у дна, поскольку формируемый раком-щелкуном в водном слое акустический импульс имеет диаграмму направленности в вертикальной плоскости. В импульсах, отраженных от поверхности моря, четко выражена противофаза, но нет эффекта от диаграммы направленности. Расчеты показали, что в данном случае рако-щелкун мог находиться на дистанции $r = 5,6$ м от вертикальной приемной системы (см. рис. 3б).

Небольшие расхождения между экспериментальными и расчетными значениями временных интервалов, по-видимому, обусловлены влиянием прилива 15–20 см и дневным прогревом приповерхностного слоя солнечной радиацией, т.е. в приповерхностном 0,5–1 м слое воды значение C_w , могло быть больше 1450 м/с.

Результаты численного моделирования

Для импульса, показанного на рис. 3, численное моделирование распространения высокочастотного импульса удобно провести с помощью лучевого метода мнимых источников [4]. Модельный волновод в этом случае состоит из водного слоя постоянной глубины $H = 3$ м, лежащего на «жидком» полупространстве, а акустические свойства сред слагающих волновод можно считать однородными. Полагаем, что источник акустического импульса расположен на горизонте 2,99 м. Импульсное акустическое поле формируется сферически расширяющимися волнами, генерируемыми источником и испытывающими отражение на границах раздела сред. Каждое отражение представляется в виде луча, исходящего из мнимого источника, а коэффициент отражения определяется соотношением акустических характеристик граничащих сред. В результате интерференции этих лучей в водном слое формируется неоднородное акустическое поле, в котором, согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 3, наименьшие значения амплитуды прямого сигнала измерены нижним гидрофоном р3 возле дна. Здесь следует отметить, что амплитуда акустического

импульса, отраженного от поверхности моря, значительно превышает амплитуду «прямого» сигнала, по-видимому, это обусловлено интерференцией прямого импульсного сигнала с сигналом, отраженным от поверхности дна. Покажем это с помощью численного моделирования, проведенного согласно схеме, представленной на рис. 4.

Следуя работе [4], граница «вода – воздух» может считаться абсолютно мягкой, т.е. амплитуда звукового давления на ней равна 0, а коэффициент отражения акустической волны равен -1 , но при этом фаза колебаний звукового давления отраженной волны изменяется на 180° . Граница «вода – дно» имеет импедансный характер, и коэффициент отражения на ней определяется соотношением скоростей звука $n = C_0 / C_1$ в воде C_0 и в грунте C_1 , соотношением плотностей $m = \rho_1 / \rho_0$ воды ρ_0 и грунта ρ_1 и углом падения волны на границу раздела θ :

$$V_1 = \frac{m \cdot \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{m \cdot \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}$$

При углах падения волны на границу больших, чем критическое значение $\theta_c = \arcsin(C_0 / C_1)$, коэффициент отражения становится

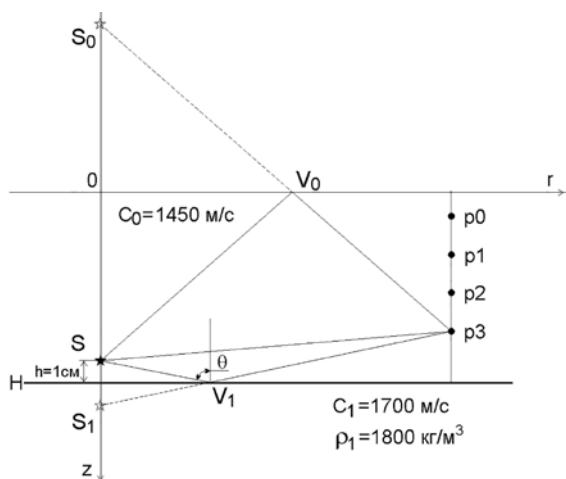


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая метод мнимых источников. V_0 – коэффициент отражения на границе «воздух – вода». V_1 – коэффициент отражения на границе «вода – дно». H – глубина водного слоя. S – действительный источник, S_0, S_1 – мнимые источники

комплексным: по модулю равным 1, что соответствует полному отражению, но при этом фаза отраженного сигнала плавно изменяется от 0 до -180° с увеличением угла падения, и существует диапазон углов падения, при которых падающий сигнал отражается практически в противофазе. В нашем случае этот угол $\theta_c = 58,5^\circ$.

Для численного моделирования, с помощью специальной программы была построена эквивалентная раку точечная функция источника, для которой были проведены расчеты формируемого в данном волноводе поля значений уровня энергии импульсного акустического поля – $SEL_{imp}(z, r)$, в вертикальной плоскости (см. рис. 5) и вариаций акустического давления – $p(t)$ (см. рис. 6а) в точках, в которых были проведены натурные измерения, представленные на рис. 6б.

На этих рисунках видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с натурными измерениями как во временной области, так

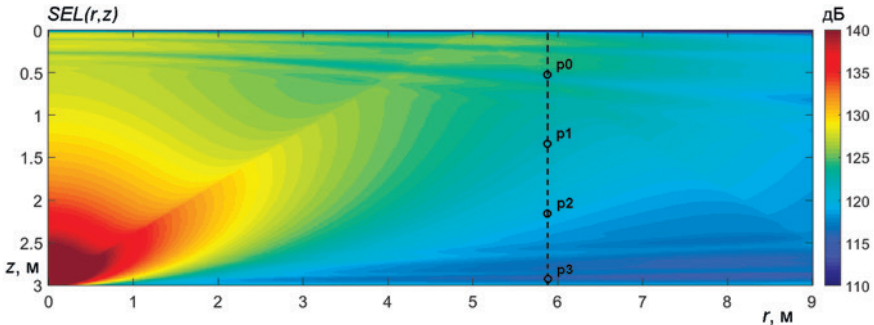


Рис. 5. Поле значений уровня энергии $SEL_{imp}(z, r)$ распространяющегося акустического импульса, иллюстрирующее интерференцию прямых водных лучей с отраженными от дна и поверхности моря. Эквивалентный раку точечный источник расположен в $r = 0, z = 2,99$ м. Угол между осью z и проявляющейся линией соответствует критическому углу падения $\theta_c = 58.5^\circ$

Таблица 1. Значения SEL, рассчитанные по временным рядам, представленным на рис. 6, величиной 6 мс

	SEL, dB, эксперимент	SEL, dB, модель
p0	119,5	122,1
p1	121,1	122,0
p2	119	119,8
p3	116,9	115,5

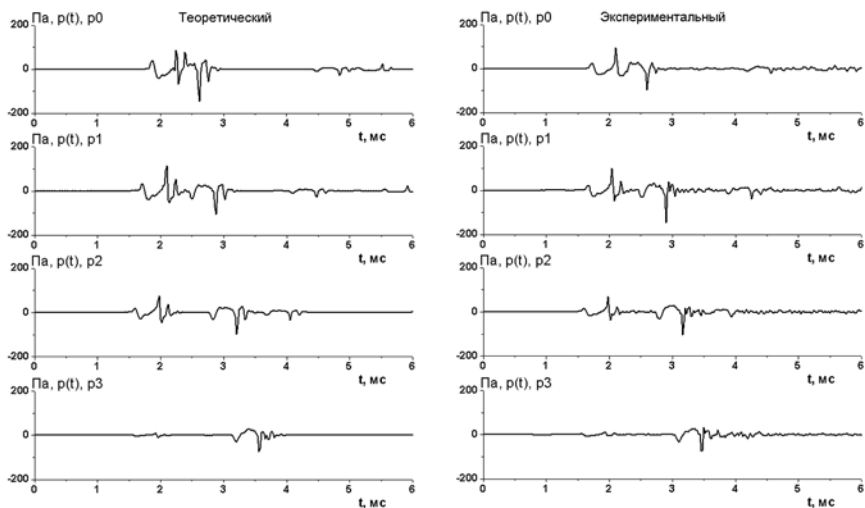


Рис. 6. Сравнение временных рядов, рассчитанных методом мнимых источников и измеренных экспериментально, для четырех гидрофонов p_0, \dots, p_3 вертикальной антенной решетки

и по суммарным значениям SEL (см. табл. 1), рассчитанным на временных интервалах, показанных на рис. 6 и равных 6 мс.

Анализ импульсных сигналов, излученных раком-щелкуном во временной области

Известно, что рак-щелкун может излучать акустические импульсы с временным интервалом 0,5 с. Нам тоже удалось измерить таких три акустических импульса, следующих с периодом 0,42 с. На рис. 7 а, б видно, что параметры этих импульсов подобны во временной области, поэтому мы считаем, что их излучил один и тот же рак-щелкун.

Согласно графикам $p(t)$ представленным на рис. 8б, первым в «точку» приема пришел водный импульс, а примерно через 2 мс пришел импульс, отраженный морской поверхностью.

Для чего рак-щелкун применяет тройки импульсов, следующих через временной интервал $Dt = 0,42$ с. На рис. 8 видно, что эти тройки могут быть объединены в посылку из 12 импульсов, причем временной интервал между тройками $DT = 1$ с. Вряд ли он связан с эхолокацией, как мы уже это видели у белого кита – белухи [9], тогда остается

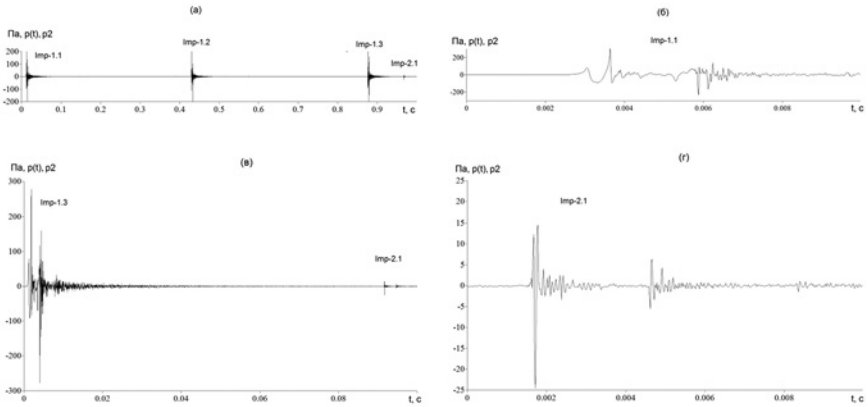


Рис. 7. а) три акустических импульса, измеренные гидрофоном р2; б) первый импульс, показанный более подробно; в) последний импульс и импульс другого рака-щелкуна; г) импульс другого рака, показанный более подробно

предположить, что это коммуникационные сигналы между разными раками-щелкунами. На рис. 7 а, в видно, что после третьего импульса первого рака-щелкуна, гидрофоны записали импульс от другого рака-щелкуна. Этот сигнал показан более подробно на рис. 4 г.

В заключение отметим, что рак-щелкун является уникальным природным источником очень мощных – 190,1 дБ отн. 1 мкПа и широкополосных, в нашем случае – до 24 кГц, акустических

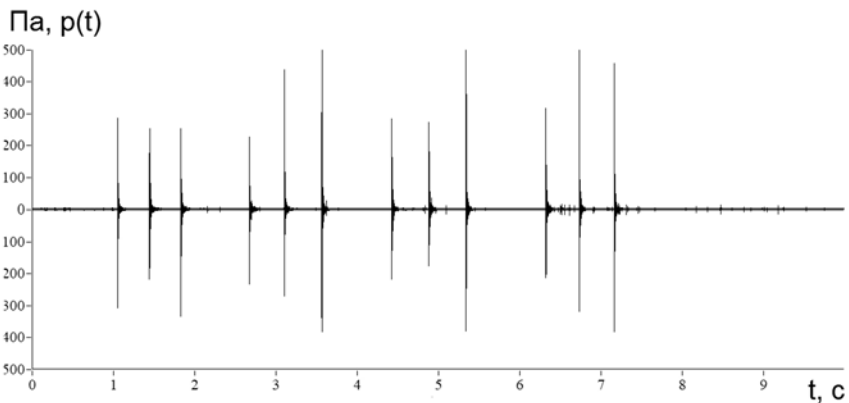


Рис. 8. Пример групповой посылки рака-щелкуна, состоящей из четырех троек

импульсов. Поскольку раки ведут малоподвижный образ жизни, то формируемые ими на шельфе акустические поля могут быть применены при решении практических задач, связанных с мониторингом параметров среды, охраной подводных объектов, обнаружением подводных пловцов и т.п. Для решения подобных задач надо научиться контролировать их естественное обитание и вызывать генерацию коммуникационных импульсов (см. рис. 7 и рис. 8), например, с помощью излучения пачек импульсов, возбуждающих у раков ответную реакцию.

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотрудникам ТОИ ДВО РАН Борисову С.И., Медведеву И.В. и студенту Травкину В.С. за активное участие в натурных экспериментах.

Литература

1. Alam P., Sanka I., Alam L.P., Wijaya S., Sintya E., Handayani N.S.N., Rivero-Möller A. The snapping shrimp dactyl plunger: a thermomechanical damage-tolerant sandwich composite // *Zoology*. 2018. V. 126. P. 1–10.
2. Бибиков Н.Г. Биошумы шельфа южных морских рубежей России и Абхазии // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / *Акустика океана*. М. ГЕОС. 2016. С. 162–165.
3. Бибиков Н.Г., Макушевич И.В. Статистические характеристики высокочастотных биошумов шельфовой зоны Черного моря // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / *Акустика океана*. М. ГЕОС. 2018. С. 169–172.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах // *Наука*. Москва. 1973. С. 343.
5. Versluis M., Schmitz B., Anna von der Heydt, Lohse D. How Snapping Shrimp Snap Through Cavitating Bubbles // *Science*. 2000. V. 289. P. 2114–2117.
6. Виноградов Л.Г. Определитель креветок, раков и крабов Дальнего Востока // *Известия Тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии*. Владивосток. 1950. Т. 33. С. 179–356.
7. Kaji T., Anker A., Wirkner Christian S., Palmer A.R. Parallel Saltational Evolution of Ultrafast Movements in Snapping Shrimp Claws // *Current Biology*. 2018. V. 28. P. 106–113.
8. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 4. С. 500–511. DOI: <http://doi.org/10.7868/S0320791915040097>.
9. Рутенко А.Н., Вишняков А.А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 3. С. 375–384. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771006030122>.

10. Tang and Staack. Shrimp claw inspires new method of underwater plasma generation // Texas A&M University. March 28 2019. <https://engineering.tamu.edu/news/2019/03/shrimp-claw-inspires-new-method-of-underwater-plasma-generation.html>.
11. Hess D., Christoph Brücker, Franziska Hegner, Alexander Balmert, Horst Bleckmann. Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw // PLOS2013. V. 8. Issue 11. e77120. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077120>.
12. Chitre M., Koay Teong-Beng, Potter J.R. Origins of directionality in snapping shrimp sounds and its potential applications // OCEANS. 2003. V. 2. DOI: <http://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178442>.
13. Choi B.K., Kim B-N., Hahn J., Kim B-C., Park Y., Jung S-K., Lee Y-K. Acoustic Characteristics of the Snapping Shrimp Sound Observed in the Coastal Sea of Korea // Jap. J. of App. Phys. 2011. V. 50. 07HG04. DOI: <http://doi.org/10.1143/JJAP.50.07HG04>.

References

1. Alam P., Sanka I., Alam L.P., Wijaya S., Sintya E., Handayani N.S.N., Rivero-Möller A. The snapping shrimp dactyl plunger: a thermomechanical damage-tolerant sandwich composite // Zoology. 2018. V. 126. P. 1–10.
2. Bibikov N.G. Shelf bio-noise of the southern maritime borders of Russia and Abkhazia // Report of the XV School-Seminar. Acad. L.M. Brekhovskiy / Akustika okeana. M. GEOS. 2016. P. 162–165.
3. Bibikov N.G., Makushevich I.V. Statistical characteristics of high-frequency bio-noise of the Black Sea shelf zone // Report of the XVI School-Seminar. Acad. L.M. Brekhovskiy / Akustika okeana. M. GEOS. 2018. P. 169–172.
4. Brekhovskiy L.M. Waves in layered environment // Nauka. Moscow. 1973. P. 343.
5. Versluis M., Schmitz B., Anna von der Heydt, Lohse D. How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles // Science. 2000. V. 289. P. 2114–2117.
6. Vinogradov L.G. Directory of Shrimp, Crayfish and Crab Far East // Izvestiâ Tihookeanskogo naučno-issledovatel'skogo rybohozâjstvennogo centra. Vladivostok. 1950. V. 33. P. 179–356.
7. Kaji T., Anker A., Wirkner Christian S., Palmer A.R. Parallel Saltational Evolution of Ultrafast Movements in Snapping Shrimp Claws // Current Biology. 2018. V. 28. P. 106–113.
8. Rutenko A.N., Borisov S.V., Kovzel D.G., Gricenko V.A. A radiohydroacoustic station for monitoring the parameters of anthropogenic impulse and noise signals on the shelf // Acoustical Physics. 2015. V. 61. № 4. P. 455–465. DOI: <http://doi.org/10.7868/S0320791915040097>.
9. Rutenko A.N., Vishnyakov A.A. Time Sequences of Sonar Signals Generated by a Beluga Whale When Locating Underwater Objects // Acoustical Physics. 2006. V. 52. № 3. P. 375–384. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771006030122>.

10. Tang, Staack. Shrimp claw inspires new method of underwater plasma generation // Texas A&M University. March 28 2019. <https://engineering.tamu.edu/news/2019/03/shrimp-claw-inspires-new-method-of-underwater-plasma-generation.html>.
11. Hess D., Brücker C., Hegner F., Balmert A., Bleckmann H.. Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw // PLOS2013. V. 8. Iss. 11. e77120. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077120>.
12. Chitre M., Koay Teong-Beng, Potter J.R. Origins of directionality in snapping shrimp sounds and its potential applications // OCEANS. 2003. V. 2. DOI: <http://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178442>.
13. Choi B.K., Kim B-N., Hahn J., Kim B-C., Park Y., Jung S-K., Lee Y-K. Acoustic Characteristics of the Snapping Shrimp Sound Observed in the Coastal Sea of Korea // Jap. J. of App. Phys. 2011. V. 50. 07HG04. DOI: <http://doi.org/10.1143/JJAP.50.07HG04>.

ЗОНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Саломатин А.С.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail: salomatin@poi.dvo.ru

Аннотация

На основе данных гидроакустических исследований шести морских экспедиций построены карты-схемы положения зон пузырьковой разгрузки метана в Татарском проливе Японского моря у о. Сахалин. Выявлены характерные особенности распределения зон пузырьковой разгрузки метана по глубине, их связи с особенностями морского дна. Оценены размеры этих зон на морском дне.

Ключевые слова: пузырьки, газовые «факелы», метан, Японское море, Татарский пролив.

THE BUBBLE SEEPAGE AREAS IN THE TATAR STRAIT OF THE JAPAN SEA

Salomatin A.S.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: salomatin@poi.dvo.ru

Abstract

The maps of bubble seepage areas in the Tatar Strait of the Japan Sea based on the data of hydroacoustic studies six marine expeditions were constructed. Characteristic features of distribution of bubble seepage areas on depth and their connection with features of the seabed were revealed. The sizes of these seepage areas on the seabed were estimated.

Keywords: bubble, gas flare, gas plume, methane, Japan Sea, Tatar Strait.

Введение

В настоящее время на морском дне повсеместно зарегистрированы зоны разгрузки метана в виде всплывающих пузырьков, образующих

в водной толще устойчивые области их повышенной концентрации – газовые «факелы» (ГФ). Всплывающие пузырьки являются эффективным механизмом переноса метана из литосферы в водную толщу и атмосферу. ГФ являются легко регистрируемым поисковым признаком зон пузырьковой разгрузки метана (ЗПРМ). Для обнаружения ГФ и, следовательно, ЗПРМ чрезвычайно эффективными являются дистанционные акустические методы, основанные на обратном рассеянии звука. На эхолотных записях ГФ наблюдаются в виде гидроакустических аномалий различных размеров и конфигураций. С каждым годом во время морских экспедиций с помощью судовых эхолотов обнаруживаются все новые ЗПРМ. Их поиск и исследование является важной научной задачей.

Основные результаты

В основу работы легли данные, полученные в шести морских экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Татарском проливе Японского моря. Гидроакустические наблюдения проводились с помощью комплекса, состоящего из модернизированных судовых эхолотов «Сарган-ЭМ», ELAC LAZ-72, двух гидролокаторов «Сарган-ГМ» и многоканальной системы цифровой регистрации гидролокационных сигналов. Гидроакустический комплекс обеспечивал одновременную регистрацию эхосигналов по четырем независимым каналам на частотах 12, 20 и 135 кГц. Одновременно с акустическими данными записывались координаты судна, полученные с помощью системы глобального позиционирования (GPS). Комплекс позволяет проводить поиск ЗПРМ, исследование их акустических проявлений в водной толще и на морском дне, а также поиск особенностей рельефа дна и рассеяния в верхней осадочной толще (10–50 м). В вышеупомянутых экспедициях в Татарском проливе было выполнено 342 регистрации ГФ в интервале глубин от 65 до 755 м. Несколько десятков ГФ регистрировались по несколько раз, в том числе в разные годы. Повторными регистрациями ГФ на глубинах менее 500 м считались регистрации ГФ, координаты которых отличались более чем на $\Delta = 30$ м. Для больших глубин этот параметр Δ увеличивался пропорционально глубине. Координаты повторных регистраций ГФ усреднялись. Таким образом,

было найдено положение 257 ЗПРМ с существенно различающимися координатами. На рис. 1 представлена полученная карта-схема ЗПРМ.

Все обнаруженные ГФ расположены у о. Сахалин. Со стороны Приморского и Хабаровского краев ни одного ГФ обнаружено не было. Большинство ГФ (253 ед.) обнаружены в узком, менее одного градуса интервале широт $48^{\circ}20' - 47^{\circ}25'$ с.ш., напротив залива Делангля. Остальные ГФ (4 ед.) расположены у южной оконечности о. Сахалин. Подавляющее большинство ГФ, а именно 80%, обнаружены в узкой простирающейся с севера на юг области, шириной около 3 км и длиной 90 км. Глубины ГФ в этой области лежат в интервале 150–337 м.

С целью выявления закономерностей пространственного распределения ГФ был построен график зависимости числа обнаруженных

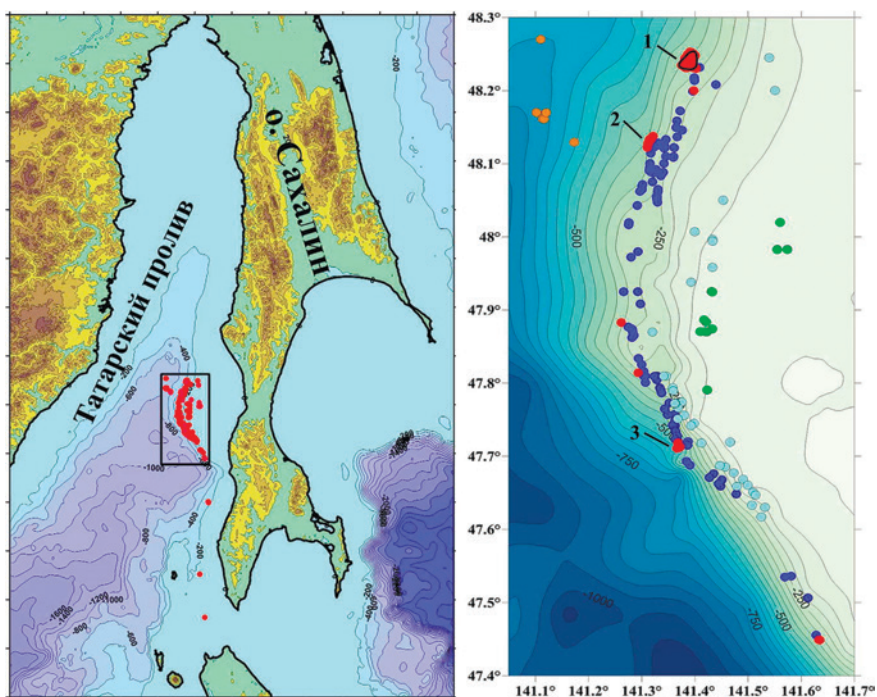


Рис. 1. Карта-схема положения ЗПРМ в Татарском проливе Японского моря. Кружками отмечено положение ГФ, оранжевыми – на глубинах более 600 м, зелеными – на глубинах менее 100 м, голубыми – в диапазоне глубин 100–150 м, синими – в диапазоне глубин 150–300 м, красными – в диапазоне глубин 300–337 м и оранжевыми – на глубинах более 600 м

ГФ от глубины (рис. 2). На полученном графике выделяются три локальных максимума. Первый находится на глубине 125 м (интервал глубин 100–150 м). Этот интервал глубин соответствует бровке шельфа и шельфу, прилегающему к ней. Вторым локальным максимумом находится на глубине 325 м (интервал глубин 300–350 м). Этот интервал глубин соответствует глубине, при которой нижняя граница зоны стабильности газогидрата метана в осадках выходит к поверхности дна. В этом интервале глубин на девяти станциях (на глубинах 322–330 м) удалось отобрать образцы газогидрата метана. Третий локальный максимум находится на глубине 675 м (интервал глубин 600–750 м). На двух станциях в области 600-метрового ГФ также удалось отобрать образцы газогидрата метана.

Из 89 ГФ обнаруженных в интервале глубин 300–337 м 85 ГФ расположены в трех областях, обозначенных на рис. 1 цифрами 1, 2 и 3. В первой области найдено 64 ГФ, причем 20 из них являлись областями с несколькими близко расположенными ГФ. Во второй области найдено 15 ГФ и в третьей – 6 ГФ. На рис. 3а приведена подробная карта-схема ГФ первой области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера в морских

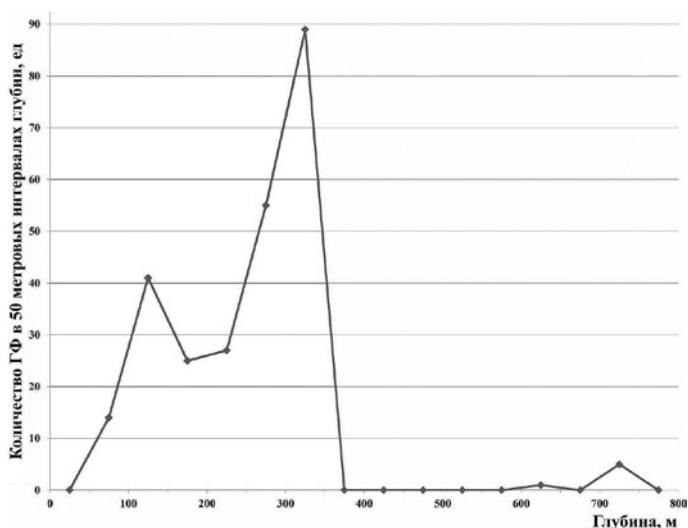


Рис. 2. График зависимости от глубины количества ГФ, обнаруженных в 50-метровых интервалах глубин

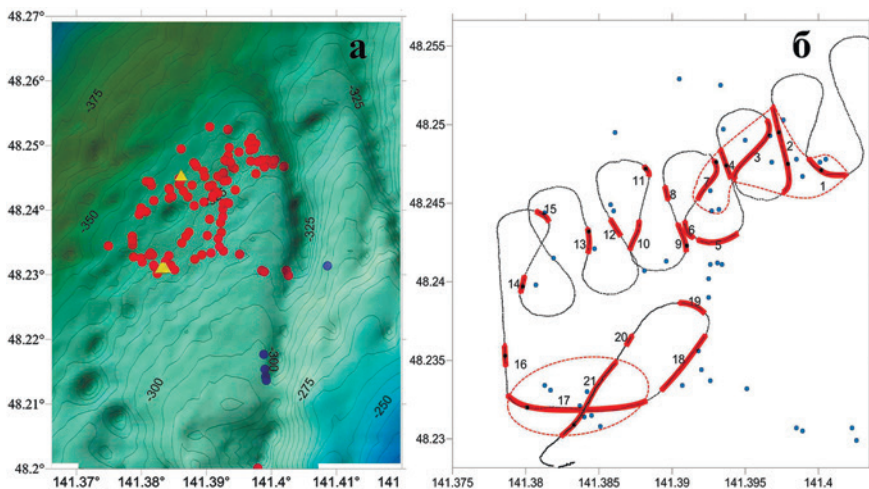


Рис. 3. Карта-схема ГФ в первой области (а) и хема движения судна во время подробной съемки первой области (б). Кружками отмечено положение ГФ, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана, тонкая черная линия – путь движения судна, толстая красная линия – движение судна в ГФ

экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Из рис. 3а следует, что большинство ГФ с глубинами 300 и более метров сосредоточены в небольшой, вытянутой вдоль линий изобат области длиной около трех километров и шириной около одного километра. В южной половине этой области ГФ образуют кольцевую структуру, в центре которой отсутствуют ГФ. На северной и южной границах этой структуры были отобраны образцы газогидрата метана. Еще четыре ГФ расположены на восточном склоне протянувшейся с севера на юг ложбины.

Как уже упоминалось ранее, в первой области было зарегистрировано большое количество протяженных областей ГФ. С целью уточнения размеров этих областей ГФ была выполнена специальная гидроакустическая съемка, результаты которой представлены на рис. 3б. Из рисунка следует, что если исключить галсы, лежащие вне первой области, то длина пути, пройденного судном во время подробной съемки в первой области, равна 15,6 км, а длина пути, пройденного судном над ГФ, равна 5,5 км. Это позволяет предположить, что около 35% площади первой области занято ГФ. Причем, как видно из рис. 3б,

многие из них сливаются в протяженный ГФ, занимающий большую площадь. Возможные границы двух самых больших протяженных ГФ в первой области обозначены на рис. 3б красными пунктирными линиями. Размеры первого протяженного ГФ, образованного ГФ 17 и 19, 550 м с севера на юг и 650 м с востока на запад, а площадь $\sim 0,35$ км². Размеры второго протяженного ГФ, образованного ГФ 1, 2, 3, 4 и 7, 570 м с севера на юг и 740 м с востока на запад, а площадь $\sim 0,04$ км².

На рис. 4а приведена карта-схема ГФ второй области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера на НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

На этой карте видно, что все ГФ с глубинами 300–337 м во второй области расположены на узком участке дна, длиной около двух километров и шириной менее пятисот метров. Причем этот участок

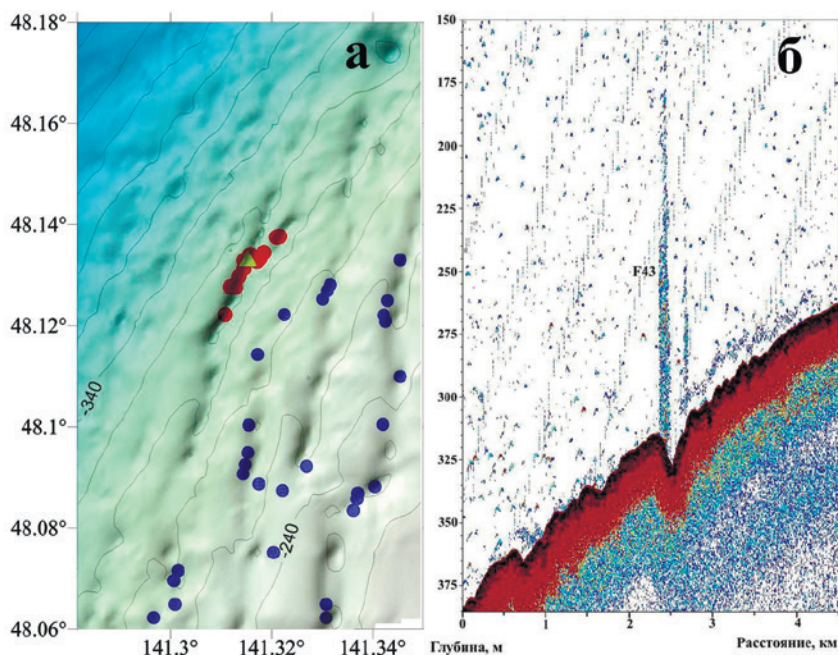


Рис. 4. Карта-схема ГФ второй области (а), и пример эхограммы ГФ во второй области (б). Красными кружками отмечено положение ГФ с глубинами 300–337 м, синими – положение ГФ с глубинами 210–300 м, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана

полностью лежит в хорошо видной на рис. 4а ложбине. На рис. 4б представлена эхограмма, полученная во время съемки второй области, при движении судна перпендикулярно к оси ложбины. На эхограмме хорошо видны протяженная область ГФ F43 шириной около ста метров на левом склоне ложбины и слабый одиночный ГФ на правом склоне ложбины. Глубина ложбины около 12 м, а ширина около 350 м. На двух станциях в различные годы в области ГФ F43 были отобраны образцы газогидрата метана.

На рис. 5 приведена подробная карта-схема ГФ в третьей области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера в морских экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». На карте-схеме видно, что в третьей области все ГФ с глубинами более 300 м расположены на склонах каньона, причем на северном склоне обнаружен один ГФ, а остальные пять ГФ на узком участке вдоль южного склона длиной около одного километра.

Из шести ГФ, обнаруженных в интервале глубин 600–750 м, два ГФ выходят из двух покмарков (от англ. rockmark), представляющих

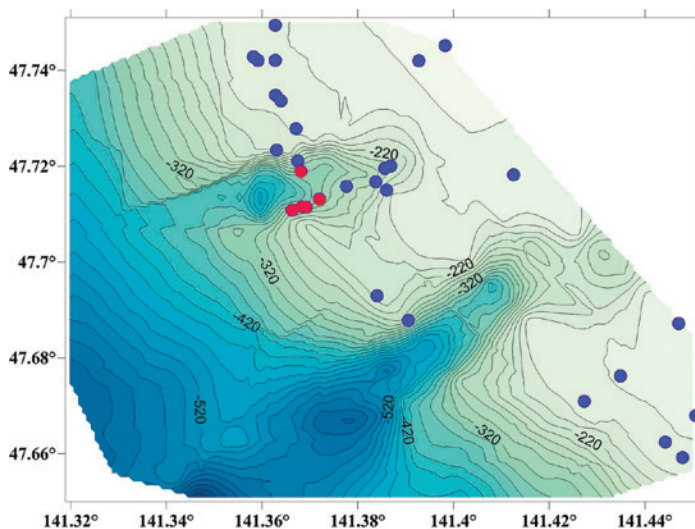


Рис. 5. Карта-схема ГФ в третьей области. Красными кружками отмечено положение ГФ с глубинами более 300 м, синими кружками отмечено положение ГФ с глубинами менее 300 м

собой конусовидные депрессии на поверхности морского дна, первый на глубине 620 м и второй на глубине 750 м (см. рис. 6).

Три других слабых ГФ находятся на расстоянии около одного километра от второго покмарка. Шестой, самый северный, ГФ был зарегистрирован только один раз, причем при его регистрации судно прошло в стороне от него, поэтому нельзя определить, выходит этот ГФ из покмарка или нет. Из рис. 6 следует, что первый покмарк имеет поперечные размеры около 500 м и глубину около 30 м, а второй покмарк имеет поперечные размеры около 550 м и глубину около 15 м. Из рис. 6 также видно, что в случае первого покмарка ГФ расположен на возвышенности на краю покмарка, а в случае второго покмарка, на его склоне. ГФ у первого покмарка регистрировался 20 раз в трех экспедициях в 2014, 2015 и 2019 годах. В этот период его интенсивность сильно изменялась вплоть до полного исчезновения. На двух станциях в области 620-метрового ГФ удалось отобрать образцы газогидрата метана. На рис. 7 представлен пример эхограммы ГФ на станции в области первого покмарка. На этой станции судно удерживалось над точкой выхода ГФ из дна. За отрезок времени с 23:25 до 23:42 судно сместилось всего на 35 м, что много меньше разрешения

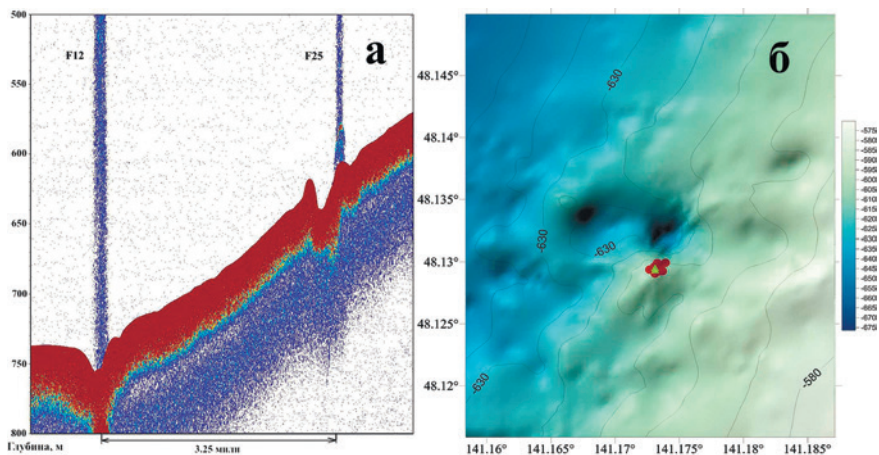


Рис. 6. Эхограмма глубоководных ГФ, выходящих из покмарков – а, карта-схема ГФ в области первого покмарка – б. Красными кружками отмечено положение ГФ при различных его регистрациях, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана

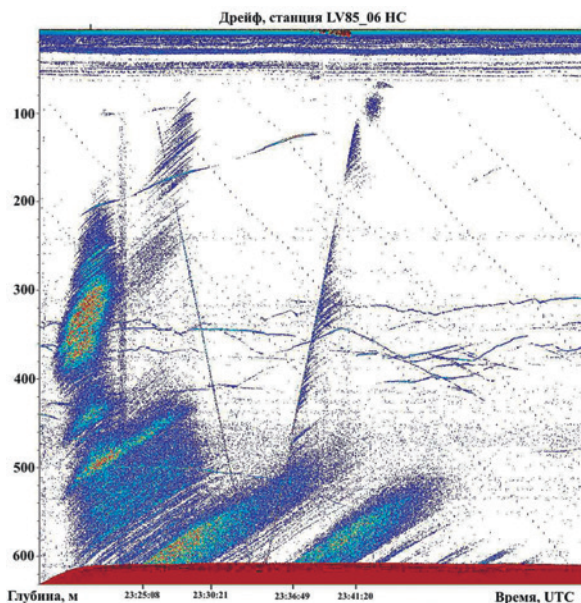


Рис. 7. Пример эхограммы ГФ на станции в области первого покмарка

эхолота по горизонтали, равного на этой глубине 130 м. На эхограмме хорошо виден процесс исчезновения ГФ. Сначала ГФ принимает ярко выраженный пульсирующий характер. На эхограмме хорошо видны две наклонные области, образованные всплывающими пузырьками, выходящими из дна в пятиминутные интервалы времени, первый интервал с 23:25:08 до 23:30:21 и второй с 23:36:49 до 23:41:21. Угол наклона этих областей определяется скоростью всплытия пузырьков, которая в данном случае равна 18 см/с. Далее следует серия коротких все более слабеющих выбросов пузырьков.

В интервале глубин 150–300 м было обнаружено 107 ГФ. Все ГФ в этом интервале глубин обнаружены в узкой простирающейся с севера на юг, вытянутой вдоль линий изобат полосе, шириной около 3 км и длиной 90 км (рис. 1, синие кружки). Более половины из них расположены на склонах многочисленных протянувшихся с севера на юг ложбин. Эти ложбины хорошо видны на подробных батиметрических картах, например, на рис. 3а и 4а. Средняя глубина ложбин примерно равна 15 м, а ширина – 300 ÷ 400 м. Типичная эхограмма

ГФ, полученная при пересечении нескольких ложбин, представлена на рис. 8.

Во всем исследуемом районе ГФ, расположенные на западном склоне ложбин, сильнее и встречаются чаще, чем на восточном склоне (см. рис. 8.). Большое количество ГФ на глубинах около 150 м сосредоточено по обеим сторонам каньона (см. рисунки 5 и 9). Здесь было обнаружено десять протяженных областей ГФ с поперечными размерами в несколько сотен метров. Например, ГФ SF44 на рис. 9 имеет поперечный размер около 300 м.

Диапазон глубин менее 150 м в упомянутых выше экспедициях изучен существенно меньше, особенно мало изучен шельф с глубинами менее ста метров. Всего на глубинах менее 150 м было обнаружено 55 ГФ, причем половина из них представляет собой протяженные области ГФ. Большинство ГФ (45 ед.) было обнаружено в интервале глубин 100–150 м в узкой полосе вдоль бровки шельфа (рис. 1, голубые кружки), и только 14 ГФ было обнаружено на шельфе в интервале

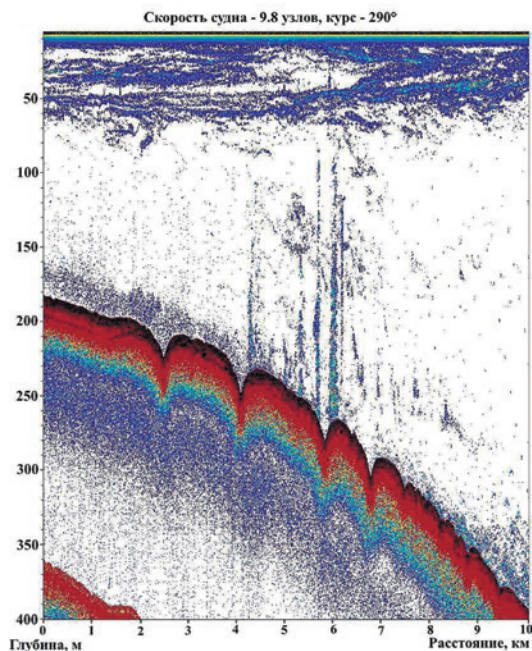


Рис. 8. Эхограмма ГФ, полученная при пересечении нескольких ложбин

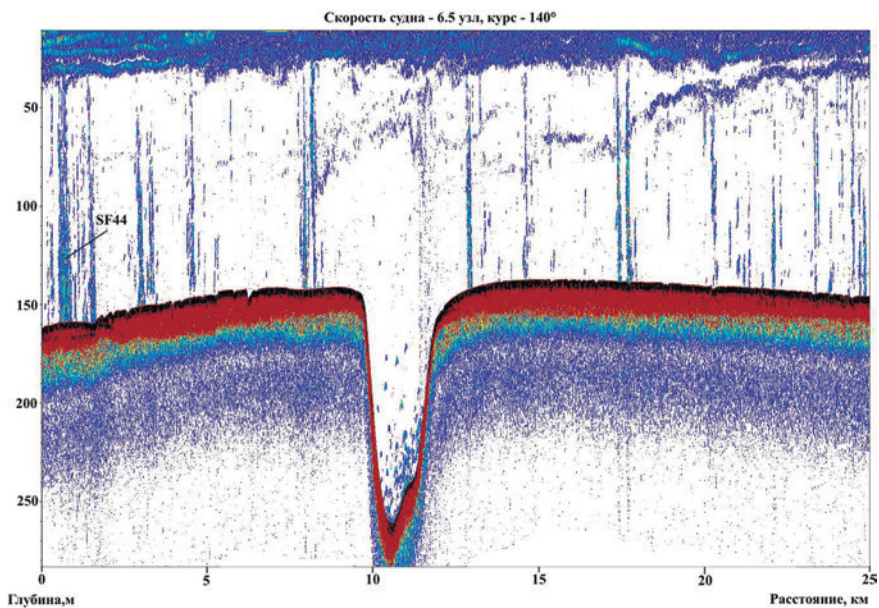


Рис. 9. Эхограмма ГФ, полученная при пересечении каньона

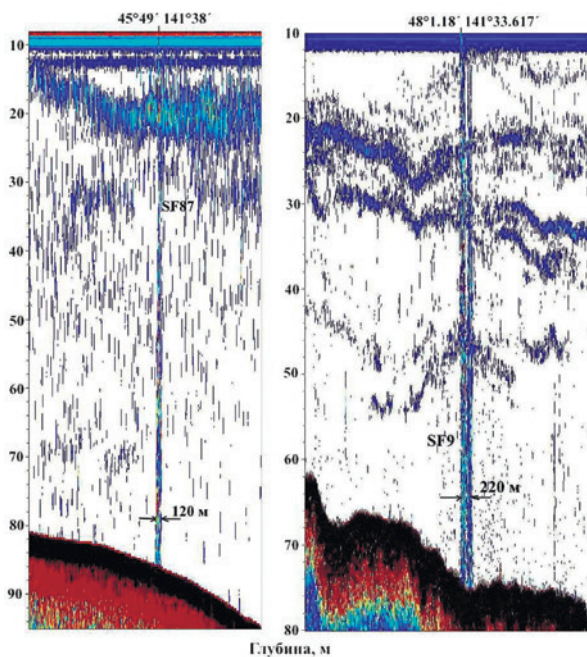


Рис. 10. Эхограммы двух протяженных областей мелководных ГФ

глубин 65–100 м (рис. 1, зеленые кружки). Примеры регистраций на шельфе двух мелководных протяженных ЗПРМ на ходу судна показаны на рис. 10. Как видно из рис. 10, пузырьки, выходящие из морского дна, достигают поверхности моря и, следовательно, переносят метан, выходящий из морского дна в виде пузырьков, непосредственно в атмосферу.

Такие области могут являться значимым источником поступления метана в атмосферу. Расчет с помощью программы SiBu-GUI [1] показывает, что на этих глубинах всплывающие пузырьки переносят непосредственно в атмосферу до 10% выходящего из морского дна в виде пузырьков метана. Сравнение результатов расчета с помощью программы SiBu-GUI с данными, полученными на стенде для исследования газообмена между всплывающими пузырьками метана и водной средой [2], показало их хорошее соответствие для малых глубин.

Заключение

На основе 342 регистраций газовых «факелов», полученных в 6-ти морских экспедициях в Татарском проливе, найдено положение 257 ЗПРМ с глубинами в интервале от 65 до 755 м. Выявлены характерные особенности распределения ЗПРМ по глубине. Построена карта-схема положения ЗПРМ в Татарском проливе у побережья о. Сахалин. Для отдельных характерных участков дна построены карты-схемы ЗПРМ, совмещенные с батиметрическими картами, построенными по данным эхолотного промера в этих экспедициях. На их основе выявлены связи ЗПРМ с такими особенностями морского дна, как бровка шельфа, ложбины, каньоны и покмарки. Оценены размеры протяженных ЗПРМ, достигающих 0,4 км². На шельфе о. Сахалин обнаружены протяженные мелководные ЗПРМ, которые могут являться значимым источником поступления метана в атмосферу.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № АААА-А20-120021990003-3.

Литература

1. Грейнерт Дж., Макгиннис Д.А. Модель растворения одиночного пузырька – графический интерфейс пользователя SiBu-GUI // Моделирование и программное обеспечение. 2009. 24. С. 1012–1013. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.12.011

2. Черных Д.В., Космач Д.А., Константинов А.В., Шахова Н.Е., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Силионов В.И., Семилетов И.П. Стенд для исследования газообмена между всплывающими пузырьками метана и водной средой // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 156–157.

References

1. Greinert J., McGinnis D.A. Single Bubble Dissolution Model – The Graphical User Interface SiBu-GUI // Environmental Modelling and Software. 2009. 24. P. 1012–1013. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.12.011
2. Chernykh D.V., Kosmach D.A., Konstantinov A.V., Shakhova N.Ye., Salomatin A.S., Yusupov V.I., Silionov V.I., Semiletov I.P. Stend dlya issledovaniya gazoobmena mezhdru vsplyvayushchimi puzyr'kami metana i vodnoy sredoy // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2019. № 1. P. 156–157.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

Самченко А.Н.* , Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

E-mail:*samchenco@poi.dvo.ru

Аннотация

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований распространения низкочастотных акустических сигналов (33 Гц) на побережье залива Петра Великого Японского моря. Источник акустических сигналов опускался с борта маломерного судна в воду, а приемные системы были у береговой черты в воде и на суше. За счет использования трехкомпонентных виброметров стало возможно разделить принятые сигналы на различные типы волн (продольные, поперечные и поверхностные). Получены предварительные результаты расчета скоростных характеристик приходов различного типа волн на виброметры.

Ключевые слова: сейсмоакустика, гидроакустический излучатель, залив Петра Великого.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF VARIOUS SPECIES OF SEISMOACOUSTIC WAVES IN THE COASTAL ZONE

Samchenko A.N.* , Pivovarov A.A., Shvyrev A.N., Yaroshchuk I.O.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences*

E-mail:*samchenco@poi.dvo.ru

Abstract

The article presents the results of experimental studies on the propagation of low-frequency acoustic signals (33 Hz) on the coast of Peter the Great Bay of the Sea of Japan. The source of acoustic signals descended from the board of a small boat into the water, and the receiving systems were at the coastline in water and on land. Through the use of three component vibrometers, it has become possible to divide the received signals into various types of waves (longitudinal, transverse and surface waves). The preliminary results of calculating the speed characteristics of the arrival of various types of waves on vibrometers are obtained.

Keywords: seismoacoustics, sonar emitter, Peter the Great Bay.

Введение

В сейсмоакустике существует несколько типов волн, распространяющихся в горных породах. В однородной изотопной среде распространяется два типа волн, которые называются: продольные, разряжения, сжатия, или Р-волны, и поперечные, сдвиговые, или S-волны. В натуральных условиях, где имеется поверхность, разделяющая среды с различными упругими свойствами, наблюдаются волны, которые называются поверхностными, или рэлеевского типа [5]. Рэлеевские волны в зависимости от условий распространения (граница раздела сред вода – горные породы, воздух – горные породы) имеют значительные различия. Каждый тип распространения волн имеет свой характер движения в среде и скоростные характеристики. В данной работе приводятся экспериментальные исследования распространения различных типов волн на побережье, где источник звука помещался в водной среде, а приемные станции стояли как на берегу, так и в море. Подобная схема экспериментальных исследований в геофизике называется методом преломленных волн (МПВ), где расстояние между источником и приемниками звука много больше, чем глубина проникновения сигнала.

Сейсмоакустические исследования на побережье имеют важное прикладное значение при инженерно-строительных работах и поиске мест полезных ископаемых. С помощью сейсмоакустических исследований уточняют геологическое строение и упругие свойства горных пород.

На мысе Шульца расположена береговая экспериментальная станция института ТОИ ДВО РАН. На станции расположен уникальный исследовательский комплекс, в который входит в том числе и лазерный трехкомпонентный деформограф [1]. Деформограф успешно применялся в ряде экспериментальных исследований [2]. Кроме того, проводились экспериментальные исследования распространения акустических импульсных сигналов, излученных в воде, а принятых на суше, на мысе Шульца [4].

Приборная база

Источником акустических сигналов использовался с борта маломерного судна гидроакустический излучатель с несущей

частотой 33 Гц. Гидроакустический низкочастотный излучатель электромагнитного типа с генерацией акустических сигналов в полосе частот 25–40 Гц, с рабочей глубиной погружения до 20 м. Излучатель развивает эффективное звуковое давление на 1 метре от центра излучателя до 1 кПа.

Прием акустических сигналов велся на автономные регистраторы гидрофизических полей, стандартный гидрофон Bruel&Kjaer 8104 и 3 сейсмоакустические станции. Регистратор гидрофизических полей обладает максимальной рабочей глубиной погружения до 200 м и автономностью до 14 суток и возможностью синхронизации между собой и с другими устройствами комплекса [3]. Датчики расположены на внешней стороне пластикового герметичного корпуса, внутри которого расположена система регистрации и блок аккумуляторов. Система регистрации состоит из микроконтроллерного блока управления, твердотельной карты памяти microSD, 24-разрядного АЦП и предварительного усилителя для канала гидрофона, 16-разрядного АЦП для канала записи гидростатического давления и цифрового канала для цифрового датчика температуры. Датчик гидростатического давления позволяет с высокой точностью определять положение регистратора по глубине и в случае небольшой глубины погружения, определять характеристики поверхностного волнения. С помощью датчика температуры определяется структура и флуктуации поля скорости звука в точке постановки автономного регистратора.

Сейсмоакустическая станция представляет собой трехкомпонентный виброметр интеллектуальный цифровой Zet 7152. Виброметр имеет частотный диапазон от 0,05 до 400 Гц с динамическим диапазоном 176 дБ. Виброметры между собой имеют синхронизацию с помощью GPS-модулей 3 мкс. Автономность виброметра до 12 часов непрерывной работы.

Схема эксперимента

Эксперимент был проведен на побережье залива Петра Великого Японского моря (рис. 1). Излучение проводилось в двух точках, в бухте Витязь с глубиной места 28 м и в заливе Посьета с глубиной

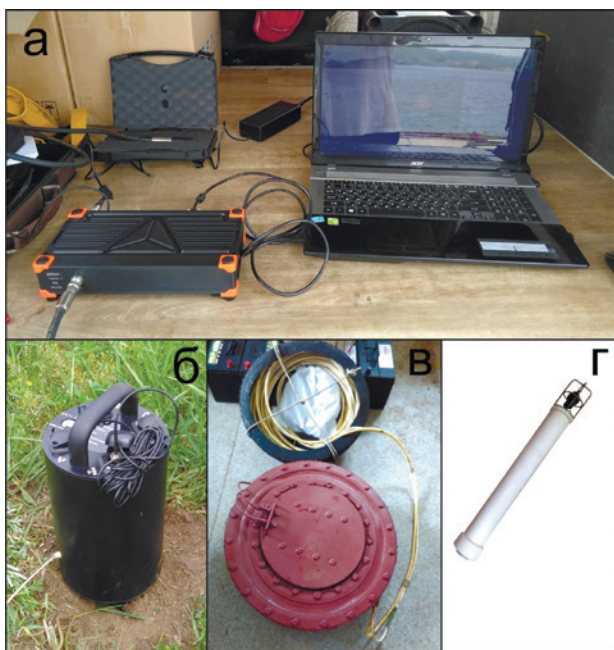


Рис. 1. а) передвижной пост регистрации акустических сигналов и стандартный гидрофон Bruel&Kjaer 8104; б) виброметр интеллектуальный цифровой Zet 7152, установленный в поле; в) гидроакустический излучатель с несущей частотой 33 Гц; г) регистратор гидрофизических полей

места 42 м. Гидроакустический излучатель опускался с борта маломерного судна на глубину 12 м. Излучение проводилось на максимальной мощности излучателя. Сейсмоакустические приемные станции были установлены на перешейке между п-овом Гамова и мысом Шульца. Все станции были ориентированы осью X на север. Первый виброметр был установлен на железобетонный постамент на берегу моря на высоте 2 м от уровня моря. Второй виброметр устанавливался в глубине перешейка на высоте 15 м от уровня моря и третий на вершине перед обрывом с высотой 22 м от уровня моря. Регистратор акустических полей был установлен на дно на глубине примерно 2 м. Вблизи использовался стандартный гидрофон Bruel&Kjaer 8104 для уточнения уровня принятых сигналов.

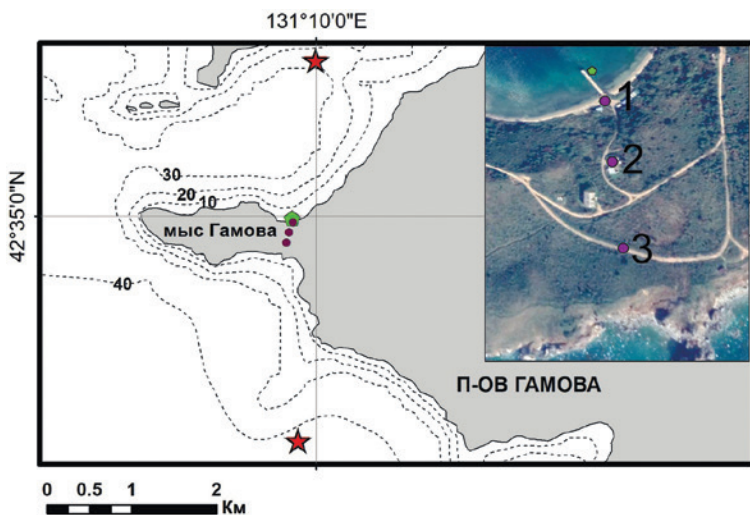


Рис. 2. Схема эксперимента. Звездочками показаны точки излучения акустических сигналов. Пятиугольником отмечена точка приема регистратором гидрофизических полей и стандартным гидрофоном Bruel&Kjaer 8104. Фиолетовые круги – точки постановки виброметров

В эксперименте проводилось излучение гармонических и сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательностей) длиной 63, 127, 255 и 511 символов, с 4–20 периодами несущей частоты на символ. Конструктивные особенности излучателя обеспечивают также существенный уровень излучения нечетных гармоник, которые сохраняют способность сворачиваться, как и основной сигнал.

Основные результаты

Принятые сигналы на гидрофонах и виброметрах имеют одинаковый характер. Поэтому на рис. 3 приведены только нормированные корреляционные функции принятых сигналов с виброметров и математической моделью. Кроме того, длина М-последовательности качественно не повлияла на полученные результаты. На рис. 4 показан геологический разрез акустической трассы. Геологический разрез построен на основе сейсмоакустических данных, анализе свойств донных отложений и геологии берега [6, 7]. Однако необходимо отметить, что

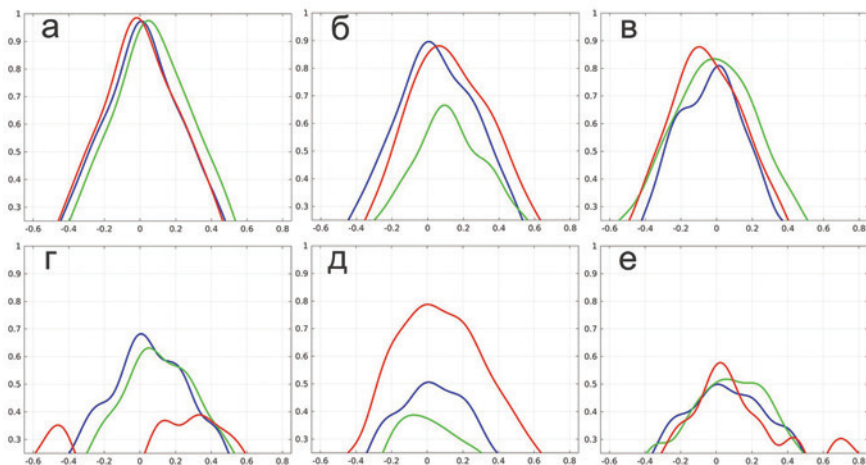


Рис. 3. Нормированные корреляционные функции между принятыми на трехкомпонентных виброметрах Zet 7152 и математической моделью сигнала, X-координата показана синим цветом, Y – зеленый, Z – красный: а) точка излучения в бухте Витязь, прием на виброметре № 1; б) излучение – бухта Витязь, прием – виброметр № 2; в) излучение – бухта Витязь, прием – виброметр № 3; г) излучение – залив Посьета, прием – виброметр № 1; д) излучение – залив Посьета, прием – виброметр № 2; е) излучение – залив Посьета, прием – виброметр № 3

все сейсмоакустические исследования проводились в отдалении от береговой черты и положение границ между геологическими слоями в модели является экстраполированным.

На рис. 3 а виден один пик на всех компонентах виброметра, поскольку излучение было проведено в бухте Витязь, где толщина ка-

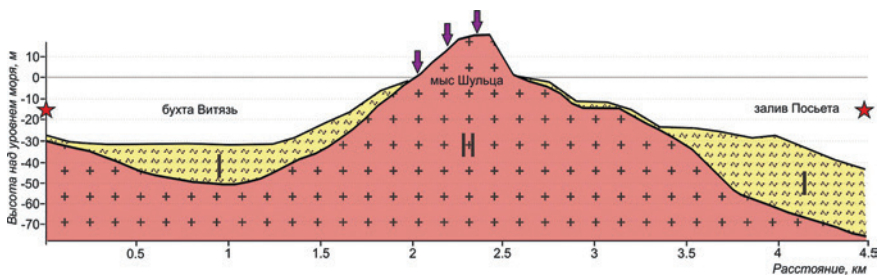


Рис. 4. Геологическая модель акустической трассы. Звездочки – точки излучения, стрелочки – точки приема. I – слой песка различного гранулометрического состава, II – гранитный слой

нала распространения сигнала была близка к его длине волны (рис. 4 левая часть). Канал распространения сигнала в данном случае – это водный слой и слой песка с близкими акустическими свойствами со скоростью продольных волн 1650 м/с. После, двигаясь по суше, сигнал, по всей видимости, начал разделяться на компоненты – продольную, поперечную и поверхностные волны. Так, в компонентах X и Y заметно раздвоение пика (рис. 3 б, в). На компоненте Z сигнал стал отставать от продольной волны, что может быть характерно для поверхностной волны, так как скорость поверхностных волн ниже, чем продольной. На рис. 3 г показаны нормированные корреляционные функции сигнала, излученного в заливе Посьета, принятого на виброметре № 1. В точке излучения из залива толщина канала уже примерно составила 2 длины волны. Таким образом, могли сформироваться разные типы волн и, кроме того, две поверхностные волны на границе гранитного и осадочного слоя и осадочный слой – вода. На рис. 3 г на компоненте Z ранее полученные скоростные характеристики поверхностных волн подтверждаются [2]. На рис. 3 д не прослеживаются приходы поверхностных волн, а лишь один пик, притом с большей интенсивностью, чем на компонентах X и Y. Канал распространения сигнала имеет очень сложную геометрию, что не позволяет проводить простыми методами математическое моделирование. В данном случае необходимо учитывать упругие свойства горных пород.

Заключение

На основе экспериментальных данных получены следующие результаты:

- Получен устойчивый уровень сигнала на всех сейсмостанциях и гидрофонах на расстоянии более 2 км при излучении сигналов как в бухте Витязь, так и со стороны открытой части залива Посьета.
- За счет использования трехкомпонентных виброметров стало возможным разделить принятые сигналы на разные типы волн (продольные, поперечные и поверхностные).
- Судя по разнице прихода основного пика (продольной волны) и полученных сигналов на компоненте Z виброметра, скорости поверхностных волн составили примерно 3100 и 1400 м/с.

Работа выполнена по госзаданию номер: АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Литература

1. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Кабанов Н.Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 235–239.
2. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Чупин В.А., Ярошук И.О. Развитие технологии томографии земной коры шельфовых областей // Докл. АН. 2017. Т. 475. № 2. С. 210–214.
3. Пивоваров А.Н., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Леонтьев А.П. Автономный регистратор гидрофизических полей. Патент на полезную модель № 171967 У1. Заявка № 2017109315/28 от 20.03.2017. Рег. от 22.06.2017.
4. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г. Мониторинг акустического поля сейсморазведочных импульсов в прибрежной зоне // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356.
5. Рэлей (Стретт Дж.В.) Теория звука. Том 1 (2-е изд.) М.: ГИТТЛ. 1955.
6. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посьета (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 1. С. 65–75.
7. Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130–136.

References

1. Davydov A.V., Dolgikh G.I., Kabanov N.F. Hydroacoustic applications of laser deformographs. *Acoustical Physics*. 1995. P. 41. № 2. P. 201–204.
2. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Chupin V.A., and Yaroshchuk I.O. Development of Tomographic Technology for the Earth's Crust in the Shelf Regions // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475. Part 1. P. 811–815.
3. Pivovarov A.N., Yaroshchuk I.O., Shvyrev A.N., Leontiev A.P. Autonomous hydrophysical fields recorder. Utility Model Patent No. 171967 U1. Application No. 2017109315/28 of 03.20.2017. Registration from 06/22/2017. (In Russian).
4. Rutenko A.N., Borovoi D.I., Gritsenko V.A., Petrov P.S., Ushchipoivskii V.G., Boekholtb M. Monitoring the acoustic field of seismic survey pulses in the near-coastal zone // *J. Acoust. Phys*. 2012. T. 58. № 3. P. 326–338.

5. Rayleigh (Strutt John). Theory of sound. Vol. 1 (2nd ed.) M.: GITTL. 1955. (In Russian).
6. Samchenko A. N., Karnaukh V.N. and Aksentov K.I. Geological and geophysical studies of the upper part of the sedimentary cover and geoacoustic model of the shelf of Posyet Bay (Sea of Japan) // *Tikhookean. Geol.* 2013. 32 (1). 65–75.
7. Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Acoustic parameters of friable bottom sediments of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2017. No. 5. P. 130–136. (In Russian).

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕК С ПОМОЩЬЮ БПЛА

Федоровский А.С.

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

E-mail: fedorovskiy@hq.febras.ru

Аннотация

Выполнен обзор современных дистанционных методов оценки характеристик рек с помощью БПЛА. Показаны возможности и недостатки использования фотоизображений, лазерного, радиолокационного зондирования, привязных устройств для измерения ширин, глубин, высот уровня водной поверхности, скоростей течения и расходов воды рек с БПЛА.

Ключевые слова: гидрологические наблюдения, БПЛА, дрон, бесконтактные измерения.

NEW OPPORTUNITIES FOR RIVER EXPLORATION WITH UAV

Fedorovskiy A.S.

Far Eastern Federal University, Vladivostok

E-mail: fedorovskiy@hq.febras.ru

Abstract

A review of modern remote sensing methods for assessing river parameters using drones is carried out. The possibilities and disadvantages of using photographic images, laser, radar sounding, tethered devices for measuring widths, depths, heights of the water surface, flow velocities and flow rates of rivers from UAVs are shown.

Keywords: hydrological observations, UAV, drone, contactless measurements.

Введение

Последние десятилетия характеризуются ростом числа и масштабов катастрофических наводнений, в том числе в бассейне реки Амур [2]. Все методы снижения ущерба, включая строительство и регулирование стока водохранилищами, возведение защитных

сооружений, базируются на наблюдениях за состоянием и динамикой водных объектов. Наземные наблюдения за реками, озерами и водохранилищами чрезвычайно дороги, часто страдают низким качеством, их автоматизация сталкивается со многими трудноразрешимыми проблемами, несмотря на то что на эти цели выделяются значительные средства. На сегодняшний день практически все проводимые мероприятия не решают проблемы увеличения количества и улучшения качества гидрологических наблюдений, которое продолжают снижаться. Нужны принципиально новые подходы. Один из них – использование для гидрологических наблюдений беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), часто называемых дронами, с соответствующим оборудованием.

Полезная нагрузка малых БПЛА до недавнего времени ограничивалась фотокамерами, не считая датчики, обеспечивающие, собственно, полет носителя. Получаемые изображения земной поверхности, в том числе мультиспектральные, позволяют решать многие задачи как в гидрологии, так и в ряде других областей. Применение активных методов ДЗ (лазерное, радиолокационное), существенно расширяющих их возможности для измерения уровня воды, глубины и скорости течения рек, сдерживается отсутствием легких сенсоров. Актуальность проблемы нельзя переоценить. Несмотря на то что методы и оборудование для ДЗ со спутников, самолетов и вертолетов разработаны давно и успешно используются, их массовое применение ограничено высокой стоимостью, сложностью организации полетов и в конечном счете нерентабельностью обслуживания большого количества пунктов гидрологических наблюдений на малых и средних реках, на которых, собственно, и формируется паводочный сток.

На первых порах дроны применялись большей частью для аэрофотосъемки в интересах геодезии и картографии [3, 5]. По мере накопления опыта разработки летающих платформ, в том числе создания легких и мощных электродвигателей, аккумуляторов большой электрической емкости появилась возможность поднимать в воздух на относительно продолжительное время разнообразное измерительное оборудование. Одновременно с этим стали развиваться целые отрасли, разрабатывающие компактные измерительные системы для дронов.

Выделяются следующие системы (направления) ДЗ, платформой которых служат БПЛА:

1. Системы измерений по фотоизображениям;
2. Лазерные и радиолокационные системы измерений;
3. Гибридные системы как комбинация других систем измерений.

В статье сделана попытка обобщить имеющийся опыт применения малых беспилотных летательных аппаратов для оценки таких гидрологических характеристик, как высота уровня воды, глубина водоема, скорость течения и расход воды с применением современных бесконтактных методов.

Системы измерений по видео- и фотоизображениям

Измерения параметров водных объектов по фотоснимкам с летательных аппаратов имеют длинную историю [3, 4, 5]. Так, еще в 60-х годах прошлого века в аэрогеодезии широко применялись стереофотограмметрические методы измерения глубин рек и прибрежных участков морей по разности продольных параллаксов точек аэрофотоснимков с изображением дна реки сквозь прозрачный слой воды. При аэрофотосъемке водоемов проектирующие лучи проходят две среды – воздух и воду, имеющие различные коэффициенты преломления. В результате проектирующий луч изменяет направление в воде, и точки дна изображаются на аэрофотоснимке с некоторым линейным искажением, которое и лежит в основе оценки глубины. В гидрологии этот метод сдерживался из-за низкой прозрачности речных вод, зависимости от погодных условий, прибрежной растительности и других факторов. Продолжение «оптического» направления получило в методе оценки глубин, основанном на связи глубины потока с яркостью пикселей на RGB-аэрофотоснимках, так как глубокий водный водоем выглядит темнее на фотографии, чем мелкий [16].

Кроме глубины, отраженный сигнал подвержен влиянию таких факторов, как цвет и мутность воды, отражательная способность донных отложений. Предложен алгоритм устранения влияния на сигнал прочих факторов, кроме глубины. Авторы отмечают, что в экспериментах съемки выполнялись с БПЛА бытовой камерой, снабженной объективом с переменным фокусным расстоянием невысокого

разрешения, что ограничивало резкость фотографий и таким образом снижало точность оценки глубин. В этой связи рекомендовано использование высококачественных широкоугольных объективов с фиксированным фокусным расстоянием, которые дают четкие изображения и широкий охват при съемке на низких высотах полета, что также улучшает разрешение снимка.

Косвенные методы оценки скоростей течения применяются в условиях невозможности проведения инструментальных наблюдений [1]. В гидрометрии широко распространен метод, основанный на измерении времени перемещения поверхностных или глубинных поплавков Δt на участке реки известной протяженности Δl . Скорость течения оценивается по формуле $V = \Delta l / \Delta t$. Точность метода во многом определяется условиями измерений. В 60-х годах прошлого века проектно-изыскательские и научно-исследовательские институты «Ленгидропроект», «Гидропроект имени С.Я. Жука» имели в своем распоряжении пилотируемые самолеты и широко применяли аэрометоды для оценки как поверхностных, так и средних скоростей течения рек путем последовательной съемки предварительно сброшенных вдоль створа реки поплавков (сосудов с красящей жидкостью). Со временем эти методы совершенствовались, однако смысл их остался прежним.

В международной гидрологической практике распространены следующие методы оценки поверхностных скоростей течения: измерение скорости по слежению за плавающими объектами – PTV (Particle tracking velocimetry), измерение скорости по анализу изображений объектов – PIV (Particle image velocimetry) и его развитие – LSPIV (Large scale particle image velocimetry), измерение скорости на основе учета пространственно-временных изменений на изображениях – STIV (Space-time image velocimetry) и некоторые другие. Так, оценка поверхностной скорости течения реки методом STIV предпринята в работе [9]. Применены две процедуры: стабилизация изображения и оценка скорости потока. В процедуре стабилизации размытость видеоизображения корректировалась путем комбинации двух схем обработки изображений: корреляция фазы, инвариантной к вращению, – RIPOC (The rotation invariant phase only correlation)

и масштабно-инвариантное преобразование функции – SIFT (The scale invariant feature transform). Оценка поверхностной скорости потока проводилась на основе учета пространственно-временных изменений на снимке (STIV), а именно адвекции поверхностных объектов, таких как рифели или плавающие объекты. Метод применен к половодью 2014 года на р. Уоно (Япония) шириной около 150 метров на участке 200 метров. Точность метода была оценена сравнением с данными акустического профилографа – ADCP (Acoustic Doppler current profiler). Также получено хорошее совпадение с распределением поверхностных скоростей, оцененного методом STIV по видеоизображениям с береговой видеокамеры.

В работе [18] выполнен критический анализ применения методов LSPIV и PTV, определены их основные достоинства и недостатки. Показано, что фиксируемые на изображении небольшие волны на поверхности воды вследствие турбулентности перемещаются со скоростью потока, но волны на свободной поверхности могут генерироваться силами тяжести, которые перемещаются во всех направлениях и могут нарушить их движение, а следовательно, и точность оценки скорости и направления течения. В работе [17] разработан алгоритм, позволяющий устранять такие нарушения и очищать изображения от наложений на волны, перемещающиеся со скоростью потока. Процедура, предложенная в этом исследовании, может значительно улучшить точность оценки поверхностной скорости потока также в условиях влияния ветровых волн. Влияние ветрового волнения на оценку поверхностной скорости реки исследовано в работе [19]. Предложен новый метод, позволяющий оценивать поверхностные скорости и направления движения воды более устойчиво по сравнению с LSPIV и STIV.

Важным аспектом точности расчета расхода воды служит переходный коэффициент α между поверхностной и средней скоростью потока. Этот вопрос исследовался для 3611 станций во Франции [13]. Среднее значение коэффициента оценено равным 0,8, установлена связь α с гидравлическим радиусом и коэффициентом шероховатости русла.

В университете Кобэ (Япония) разработана целостная система наблюдений за распределением поверхностной скорости по методу STIV и оценке расхода воды в реке [10]. Система получила название

KU-STIV (Kobe university space-time image velocimetry). Она использует видеозаписи с береговых камер и беспилотных самолетов. Компьютерной программой на поверхность реки вдоль створа на скоростных вертикалях накладывается виртуальная «сетка линий» длиной 10–20 м (рис. 1). Скорость потока вычисляется по времени, в течение которого рябь на водной поверхности или плавающие предметы переместятся вдоль этих линий, чтобы затем косвенно вычислить расход воды в этом створе. Поверхностные скорости, расходы воды по этой системе находятся в хорошем соответствии с данными акустического профилографа, однако система KU-STIV работает более оперативно и безопасно.

Высота уровня воды над некоторой плоскостью сравнения (обычно над уровнем моря, абс. м) определяется для оценки площади поперечного сечения реки при расчете расхода воды, напора воды на гидроэлектростанции, запаса воды в водохранилище и прочих характеристик в гидрологии, гидротехнике и других областях. Сеть приборов для измерения уровня воды отражает локальные условия, их данные сложно, а зачастую невозможно обобщить в пространстве, что



Рис. 1. Снимок с экрана ПК англоязычной версии системы KU-STIV. (по: <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/2016/1-measuringriv.jpg>)

особенно важно в период наводнений. В работе [12] представлен новый подход к дистанционной оценке высоты уровня воды путем интегрирования фотограмметрических измерений по снимкам с БПЛА и метода распознавания образов. Метод был опробован для измерения уровня воды в нижнем бьефе гидроэлектроэнергии Мяовой (Miaowei) (КНР) и результаты показали, что технология имеет высокую точность и оперативность. Авторы отметили также, что уровень измерялся в условиях бурного потока нижнего бьефа ГЭС, в которых другими методами его измерить невозможно.

Лазерные и радиолокационные системы измерений

Комплексный подход к оценке расхода воды с БПЛА дан в работе [14]. В ней измерения поверхностной скорости течения воды выполнены по тепловым изображениям и батиметрического лазерного лидара. Из-за веса датчиков потребовались два БПЛА. Первый переносил камеры инфракрасного и видимого диапазона, второй – поляризационный лидар. Был получен ряд тепловых разновременных изображений и применен метод измерения скорости по изображениям объектов (PIV), в качестве которых выступали термические неоднородности на водной поверхности. Обнаружить их оказалось легче, чем следить за движением плавающих объектов (например, пена, мусор) в видимом диапазоне с тем, чтобы выполнить стандартный метод оценки скорости по крупномасштабным изображениям частиц (LSPIV). С помощью лидара измерялись глубины (батиметрия) для расчета площади поперечного сечения потока. Измерения проведены на двух поперечных створах реки, чтобы оценить точность дистанционно измеренных скоростей, глубин и расходов. Тепловой PIV оценил скорости, которые были достаточно близки ($R^2 = 0.82$ и 0.64) к скоростям, измеренным акустическим профилографом. Глубины, полученные лидаром, вполне соответствовали измеренным значениям ($R^2 = 0.95$). В работе отмечается, что за последние 20 лет лазерная батиметрия, которая была первоначально разработана для прибрежных морских областей, получила распространение в речных исследованиях. Однако прозрачность воды и коэффициент отражения дна могут ограничить успех любого пассивного или активного оптического

метода в реках, включая батиметрические измерения лидаром. Альтернативное направление – радиолокационное зондирование с помощью устройств, получивших название георадар – GPR (Ground penetrating radar). Из-за особенностей поглощения зондирующего сигнала в воде георадар может быть применен в реках с содержанием взвешенных наносов до 10 000 мг/л. Авторы отмечают, что технология GPR весьма перспективна для бесконтактного батиметрического картографирования в пресноводных реках с высокими концентрациями взвешенных наносов.

Компания Astralite изготовила первый в своем роде компактный лидар, предназначенный для проведения топографических и батиметрических исследований, который благодаря небольшому весу можно закрепить на БПЛА среднего размера (рис. 2).

Лидар весит около 5 кг, позволяет получить карту распределения глубин до 5 метров.

Возможность использования радиолокации для гидрологических целей рассмотрена в работе [6]. Отмечается, что средства сверхширокополосной радиолокации, как радары подповерхностного зондирования (георадары), позволяют проводить непрерывный мониторинг исследуемой среды для дальнейшей обработки, анализа и контроля полученных данных. Особенно они эффективны при установке на небольших БПЛА. Кратко рассмотрев теорию радиолокации, авторы представили метод обнаружения СШПС с неизвестным временем



Рис. 2. Лидар Edge компании Astralite на БПЛА DJI Matrice 600 Pro (по: <https://hightech.plus/2019/10/21/sozdan-pervii-kompaktnii-lidar-dlya-podvodnih-issledovaniy>)

прихода и с узкополосными помехами, помимо белого шума. Также обозначен выбор двух преобразований для последующего анализа СШПС, имеющих преимущества перед остальными как в теоретической, так и практической областях. Авторы работы [8] сосредоточили внимание на тестировании георадара и миниатюрного лазерного дальномера для измерения высоты уровня водной поверхности. Точность оценки георадаром составила не менее 0,5% при максимальной высоте полета 60 м. Лазерный дальномер показал самое низкое расхождение луча, которое позволило избежать помех от береговой растительности. Вместе с системой спутниковой навигации GNSS дальномер позволяет измерить уровень воды со средней точностью не менее 5–7 см.

Значительные усилия по установке георадаров на дроны принимаются в подразделениях Геологической службе США (USGS), занимающихся гидрологическими наблюдениями. Так, в работе [10] приведены сведения о практических испытаниях небольшого георадара, установленного на дроне (рис. 3).

Среди специализированных георадаров, устанавливаемых на дроны, можно выделить модели: Radarteam Cobra Plug-in, SPG-1600, Zond-12e 500A (рис. 4, а, б, с соответственно).

Конструирование специализированного «гидрологического радара» для дрона на основе существующих электронных конструкций показано в работе итальянских специалистов [10]. Авторы сделали попытку установить на дроне усовершенствованный миниатюрный доплеровский радарный датчик, работающий на частоте 24 ГГц и первоначально предназначенный для оценки трафика дорожного движения, для



Рис. 3. Дрон с геолокатором и акустический профилограф перед экспериментом (по: <https://www.usgs.gov/centers/co-water/science/radar-drones?>)



а) б) в)

Рис. 4. Георадары, установленные на дроны: а) – Radarteam Cobra Plug-in (по: <https://sovzond.ru/press-center/news/corporate/4527/>); б) – SPG-1600 (по: <http://geo-scanner.ru/georadar-spg-1600-/>); в) – Zond-12e 500A (по: <https://radseismsys.ru/catalog/georadary/zond-12e-500a-mgts-bpla-dron>)

оценки поверхностной скорости потока. Компоненты датчика смонтированы на плате с антенной на одной стороне и электроникой – на другой. Ширина луча антенны на уровне половинной мощности не превышает 10 градусов. Датчик монтируется на дроне под углом 45 градусов относительно плоскости полета. С момента выхода статьи авторов прошло уже 5 лет, и на рынке появились подобные приборы. Так, в КНР разработан радар для измерения поверхностной скорости течения водных объектов Stalker II SVR (рис. 5).

Диапазон измерения скорости течения составляет от 0,15 до 15 м/с при погрешности не более 8,8 мм/сек и разрешении ± 1 мм/сек.

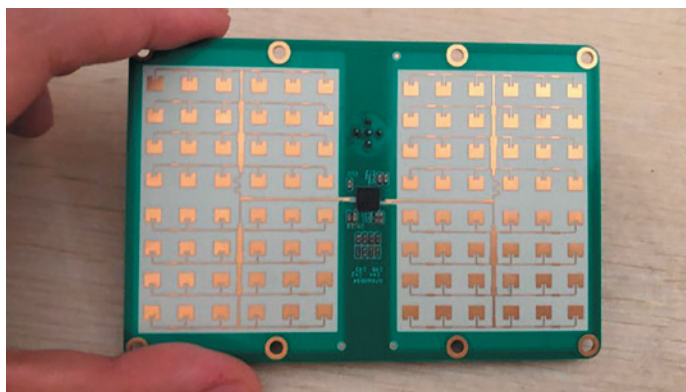


Рис. 5. 24 ГГц микроволновой радар Stalker II SVR (по: <https://aliexpress.ru/item/4000189294457.html>)

Продолжительность измерения: $2 \div 240$ сек, интервал выборки от 8 сек до 5 час. Расстояние от плоскости датчика до поверхности воды от 0,5 до 35 м. Компоненты датчика смонтированы подобно плате, рассмотренной выше. SVR использует доплеровский эффект для измерения поверхностной скорости течения воды, излучая электромагнитную волну частотой 24,15 ГГц. Прибор содержит все необходимые компоненты для встраивания в измерительную гидрологическую систему, в том числе интерфейс ввода/вывода. Размер датчика: 106×79 мм, напряжение питания: $5,5 \div 30$ В постоянного тока, сила тока: 130 мА (в режиме измерения), 1 мА (в режиме ожидания), угол передачи антенны: $20 \times 12^\circ$. Подключение к SVR осуществляется через шину RS-485, скорость передачи – 9600 бод, разрядность – 8 бит. Прибор уже устанавливается на гидростанциях КНР в составе автоматизированных гидрологических комплексов.

Гибридные системы

Оригинальный метод измерения глубины реки, который можно отнести к гибридным системам измерений, предложен в работе [7]. Авторы использовали компактный однолучевой эхолот, привязанный к БПЛА типа DJI Mavic Pro (рис. 6).

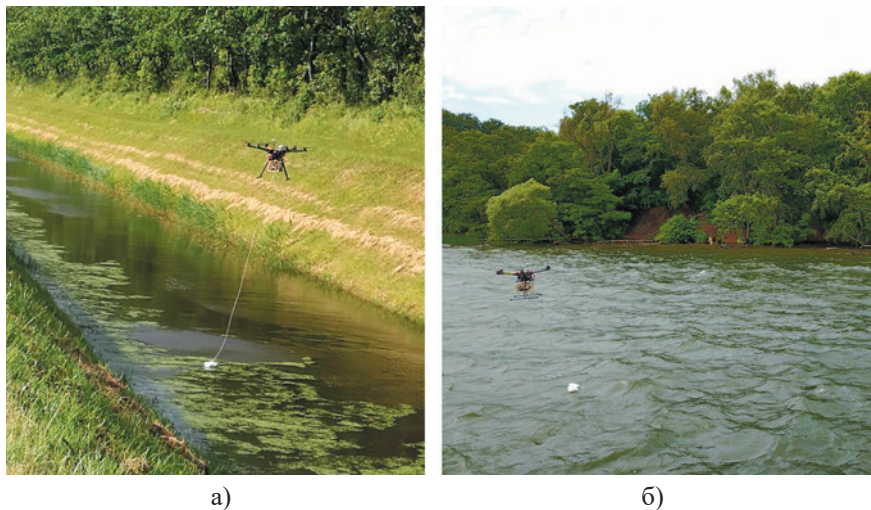


Рис. 6. Применение компактного плавающего эхолота, перемещаемого БПЛА, для измерения глубин: а) на канале Марребэк; б) озере Фюрес (Дания)

Разработанный метод комбинирует преимущества БПЛА с потенциалом эхолота, который может измерять глубины с точностью около 2% фактической глубины в диапазоне от 0,1 до 35 м вне зависимости от мутности воды.

Заключение

Опыт применения для исследования рек малых беспилотных летательных аппаратов, или как их еще называют – дронов, снабженных различными приборами для проведения бесконтактных измерений, позволяет констатировать появление нового направления – дронометрии. Объектом этого направления стали важнейшие характеристики рек: высота уровня воды, глубина водоема, скорость течения и расход воды. Диапазон используемых дронами средств бесконтактных измерений уже достаточно широк. Если на начальном этапе их применения в гидрологии активно использовались главным образом фотокамеры, в том числе мультиспектральные, то в настоящее время стали широко применяться лазерная и радиолокационная техника. Созданы компактные приборы, которые могут быть установлены на малые аппараты. Полученные оценки точности измерений характеристик водных объектов вполне обнадеживающие. Специализированные гидрологические БПЛА могут существенно повысить безопасность гидрологических работ, особенно в периоды наводнений, повысить число пунктов наблюдений за водными объектами при снижении себестоимости работ. В конечном счете заполнить разрыв между спутниковым зондированием и наземными наблюдениями.

Литература

1. Богатов В.В, Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 384 с.
2. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.
3. Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. М.: Ракурс, 2011. 12 с. <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-1>.

4. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия. 2004. 336 с.
5. Сечин А.Ю., Дракин М.А., Киселева А.С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Ч. 2. М.: Ракурс. 2011. 12 с. <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-2>.
6. Туленков Н.И., Nhat D.D. РЛС подповерхностного зондирования со сверхширокополосным сигналом (СШПС) // Мат-лы междунар. конф. «Системы радиолокационного мониторинга» / Radar monitoring systems. 2017. С. 33–41.
7. Bandini F., Olesen D., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang Sh., Garcia M., Bauer-Gottwein P. Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. V. 22. P. 4165–4181. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018>.
8. Bandinia F., Jakobsenb J., Olesenb D., Reyna-Gutierrez J.A., Bauer-Gottweina P. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight unmanned aerial vehicles // *Journal of Hydrology.* 2017. V. 548. P. 237–250.
9. Fujita I., Notoya Y., Shimono M. Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands. 2015. P. 1–10.
10. Fujita I. Measuring river surface flow with image analysis. 2016. <http://phys.org/news/2016-04-river-surface-image-analysis.html>.
11. Fulton J.W. Radar on Drones. 2020. <https://www.usgs.gov/centers/co-water/science/radar-drones>.
12. Gao A., Wu S., Wang F., Wu X., Xu P., Yu L., Zhu S. A newly developed unmanned aerial vehicle (UAV) imagery based technology for field measurement of water level // *Water.* 2019. V. 11. P. 1–15. www.mdpi.com/journal/water.
13. Hauet A., Morlot T., Daubagnan L. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: a review over a large sample of rivers // Book of abstracts conference «River Flow 2018». Lyon-Villeurbanne (France), 2018. P. 221–222.
14. Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric LIDAR // *Remote Sensing.* 2019. 11. 2317. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2317>.
15. Moramarco T., Alimenti F., Zucco G., Barbetta S., Tarpanelli A., Brocca L., Mezzanotte P., Rosselli L., Orecchini G., Virili M., Valigi P., Ciarfuglia T., Pagnottelli S. A prototype of radar-drone system for measuring the surface flow velocity at river sites and discharge estimation // *Geoph. Res. Abs.* 2015. V. 17. <https://www.researchgate.net/publication/275221939>.
16. Peggy Z., Flener C. Experiences from the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for River Bathymetry Modelling in Norway // *Vann (03).* 2013. P. 351–360.
17. Tani K., Fujita I. Wavenumber-frequency analysis of river surface texture to improve accuracy of image-based velocimetry helicopter // Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 201.

18. Tauro F., Piscopia R., Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: Large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? // *Water Res. Res.* 2017. V. 53 (12). P. 10374–10394.
19. Tsuji I., Tani K., Fujita I., Notoya Y. Development of aerial space time volume velocimetry for measuring surface velocity vector distribution from UAV // *Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France)*. 2018. P. 202.

References

1. Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Basics of river hydrology and hydrobiology. – Vladivostok: Dalnauka, 2017. 384 p.
2. Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., Motovilov Yu.G., Kalugin A.S. Catastrophic flood in the Amur river basin of 2013: formation conditions, assessment of frequency, modeling results // *Wat. Res.* 2014. V. 41 (2). P. 111–122.
3. Zinchenko O.N. Unmanned aerial vehicle: aerial photography application for mapping. M.: Rakurs. 2011. 12 p. <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-1>.
4. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerospace methods of geographical research. M.: Academy. 2004. 336 p.
5. Sechin A. Yu., Drakin M.A., Kiseleva A.S.M.: Rakurs. 2011. 12 p. <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-2>.
6. Tulenkov N.I., Nhat D.D. Subsurface sensing radar with ultra-wideband signal (UWBL) // *Mat. of the int. conf. "Radar monitoring systems" / Radar monitoring systems*. 2017. P. 33–41.
7. Bandini F., Olesen D., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang Sh., Garcia M., Bauer-Gottwein Pe. Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. V. 22. P. 4165–4181. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018>.
8. Bandini F., Jakobsen J., Olesen D., Reyna-Gutierrez J.A., Bauer-Gottweina P. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight unmanned aerial vehicles // *J. of Hydrology*. 2017. V. 548. P. 237–250.
9. Fujita I., Notoya Y., Shimono M. Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques // *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*. Hague, Netherlands. 2015. P. 1–10.
10. Fujita I. Measuring river surface flow with image analysis. 2016. <http://phys.org/news/2016-04-river-surface-image-analysis.html>.
11. Fulton J.W. Radar on Drones. 2020. <https://www.usgs.gov/centers/co-water/science/radar-drones>.
12. Gao A., Wu S., Wang F., Wu X., Xu P., Yu L., Zhu S. A newly developed unmanned aerial vehicle (UAV) imagery based technology for field measurement of water level // *Water*. 2019. V. 11 P. 1–15. www.mdpi.com/journal/water.

13. Hauet A., Morlot T., Daubagnan L. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: a review over a large sample of rivers // Book of abstracts conference "River Flow 2018". Lyon-Villeurbanne (France), 2018. P. 221–222.
14. Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric LIDAR // Remote Sensing. 2019. 11. 2317; DOI: 10.3390/rs11192317. www.mdpi.com/journal/remotesensing.
15. Moramarco T., Alimenti F., Zucco G., Barbetta S., Tarpanelli A., Brocca L., Mezzanotte P., Rosselli L., Orecchini G., Virili M., Valigi P., Ciarfuglia T., Pagnottelli S. A prototype of radar-drone system for measuring the surface flow velocity at river sites and discharge estimation // Geoph. Res. Abs. 2015. V. 17. <https://www.researchgate.net/publication/275221939>.
16. Peggy Zinke and Claude Flener. Experiences from the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for River Bathymetry Modelling in Norway // Vann (03). 2013. P. 351–360.
17. Tani K., Fujita I. Wavenumber-frequency analysis of river surface texture to improve accuracy of image-based velocimetry helicopter // Book of abstracts conference. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 201.
18. Tauro F., Piscopia R., Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: Large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? // Water Resources Research. 2017. V. 53 (12). P. 10374–10394.
19. Tsuji I., Tani K., Fujita I., Notoya Y. Development of aerial space time volume velocimetry for measuring surface velocity vector distribution from UAV // Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 202.

Научное издание

ФИЗИКА ГЕОСФЕР

Сборник научных статей
по избранным материалам
XI Всероссийского симпозиума
«Физика геосфер»

Выпуск 2

Редактор *О.В. Криворучко*
Компьютерная верстка *С.В. Филатов*

Подписано в печать 30.10.2020 г.
Формат 60x90/16. Усл. п. л. 12. Уч.-изд. л. 10,4.
Тираж 300 экз. Заказ ИВ 201260

ФГУП «Издательство Дальнаука»
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7
Тел. +7 9147067252. E-mail: dalnauka@mail.ru
<http://www.dalnauka.ru>

Отпечатано в ООО «ПСП95»
г. Владивосток, ул. Русская, 65, корпус 10



Дальнаука